



ESTIMATIVAS DE DOSE DEVIDO A ACIDENTES NUCLEARES BASEADAS EM MEDIDAS DE CAMPO E OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS

André Przewodowski Filho

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Nuclear, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Nuclear.

Orientador: Roberto Schirru

Rio de Janeiro

Março de 2017

ESTIMATIVAS DE DOSE DEVIDO A ACIDENTES NUCLEARES BASEADAS EM
MEDIDAS DE CAMPO E OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS

André Przewodowski Filho

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA NUCLEAR.

Examinada por:

Prof. Roberto Schirru, D.Sc.

Prof. Cláudio Márcio do Nascimento Abreu Pereira, D.Sc.

Prof. José Antonio Carlos Canedo Medeiros, D.Sc.

Prof. Su Jian, D.Sc.

Prof. Antônio Carlos de Abreu Mol, D.Sc.

Prof. Celso Marcelo Franklin Lapa, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2017

Przewodowski Filho, André

Estimativas de Dose Devido a Acidentes Nucleares
Baseadas em Medidas de Campo e Otimização por
Enxame de Partículas / André Przewodowski Filho. – Rio
de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.

XIV, 76 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Roberto Schirru

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de
Engenharia Nuclear, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 73-76.

1. Termo Fonte. 2. PSO. 3. Dispersão Atmosférica de
Radionuclídeos. 4. Problema Inverso. 5. Correção
distribuição de dose. I. Schirru, Roberto. II. Universidade
Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de
Engenharia Nuclear. III. Título.

DEDICATÓRIA

É com muito carinho e cuidado que deixo aqui algumas palavras para minha família e amigos que próximos ou distantes participaram desta jornada.

Ao meu Pai, que mesmo não estando mais presente, me traz sempre fortes lembranças e muita força por todos seus ensinamentos ao longo de muitos anos. A minha mãe que mesmo sem entender consegue suportar o motivo de tanta ausência durante tantos anos e ainda assim não deixa de incentivar para que eu consiga passar por esta fase. A minha esposa e filhos que sempre me apoiaram em todas as ocasiões nas quais precisei, gostaria de deixar meu Muito Obrigado.

“Deus Obrigada,

Pela minha Família que me ajuda nas horas que mais preciso. Pelos meus amigos, Fiéis, que mesmo com todos os meus defeitos, me escolheram para dividir as suas vidas. Agradeço o pouco que eu tenho, pois, o pouco contigo é tudo o que preciso! Obrigada também pelos meus inimigos, pois graças a eles hoje eu sei O que eu NÃO QUERO SER, e por isso busco meu melhor!!

Amém...”

AGRADECIMENTOS

São tantas pessoas envolvidas em um único processo que a chance de não mencionar alguém não é difícil. Gostaria de iniciar fazendo um agradecimento geral a todas as pessoas que direta ou indiretamente participaram ao longo desses últimos anos de minha vida, compreendendo a dificuldade que é conseguir dedicar tempo para tantas atividades e ao mesmo tempo à todas essas pessoas.

Ao professor Roberto Schirru que com seu caráter e sabedoria ímpar passou ensinamentos muito além do que temos nas aulas.

Ao professor e amigo Cláudio Márcio, que com certeza foi o grande responsável por esta investidura, que além do convite inicial e incentivo durante todo o processo, ainda consegue tempo para nos ajudar e orientar com destreza incomparável e ideias magnificas. Ao professor e amigo André Pinheiro que além de ajudar com estudo de muitos conteúdos das aulas, fez de sua casa minha morada junto a sua família sempre que precisei. A todos os funcionários e alunos do LMP, que com um clima sensacional sempre apoiaram todos que por ali passaram e de qualquer coisa que fosse necessário.

Muito obrigado a todos!

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

ESTIMATIVAS DE DOSE DEVIDO A ACIDENTES NUCLEARES BASEADAS EM MEDIDAS DE CAMPO E OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS

André Przewodowski Filho

Março/2017

Orientador: Roberto Schirru

Programa: Engenharia Nuclear

É sabido que durante um acidente nuclear severo, a usina é levada a condições extremas, muito além daquelas concebidas em seu projeto. A progressão do acidente pode se tornar imprevisível e qualquer tentativa de se estimar o termo fonte (caracterização da liberação de material radioativo) pode ser imprecisa em ordens de grandeza, levando a uma estimativa da distribuição espacial de doses bem diferentes da realidade, podendo prejudicar fortemente a tomada de decisão. Este trabalho apresenta uma nova abordagem para melhorar a acurácia nas estimativas de distribuição de doses baseado em medidas de campo e otimização por enxame de partículas (PSO, do inglês *Particle Swarm Optimization*). O objetivo é encontrar uma matriz de correção, a qual aplicada ao mapa de distribuição de doses estimado originalmente (possivelmente incorreto), gera uma distribuição corrigida que melhor se adapta as medidas de campo obtidas. A matriz de correção proposta se baseia na concatenação de transformações geométricas e ponderação dos valores de dose. Devido à complexidade em se encontrar as transformações ótimas, foi utilizado o algoritmo PSO, uma poderosa ferramenta de otimização. Resultados demonstram que o PSO foi capaz de encontrar matrizes de correção otimizadas, que podem ser usada para melhor estimar e projetar as distribuições de doses futuras, melhorado assim o suporte à tomada de decisão.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

DOSE ESTIMATION DUE TO NUCLEAR ACCIDENTS BASED ON FIELD
MEASUREMENTS AND PARTICLE SWARM OPTIMIZATION

André Przewodowski Filho

March/2017

Advisor: Roberto Schirru

Department: Nuclear Engineering

It is well-known that under severe nuclear power plant (NPP) accident conditions, the accident progression becomes unpredictable and the source term estimation may be imprecise by orders of magnitude, leading to dose predictions very far from reality. This work presents a novel approach to improve radiation dose predictions based on field measurements and particle swarm optimization (PSO). The idea is to find a correction matrix, which applied to the originally estimated (incorrect) dose distribution map, generates a corrected one, which better fits to the actual field measurements. The proposed correction matrix is a concatenation of geometric transformations, weighted by a multiplication factor, aimed to fit the shape and dose intensities of the original to the actual dose distribution map. In order to find optimum transformations, a PSO has been used. Results demonstrate that PSO was able to find good correction matrix, which can be used to better project future dose distributions.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	1
1.1. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA E CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
1.3. OBJETIVO	7
1.4. RELEVÂNCIA	8
1.5. ORIGINALIDADE.....	9
1.6. METODOLOGIA	10
1.7. ORGANIZAÇÃO DA TESE.....	11
CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	12
2.1. PREDIÇÃO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA DE RADIONUCLÍDEOS	12
2.2. SISTEMA DE CONTROLE AMBIENTAL (SCA).....	13
2.3. OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS (PSO)	19
2.4. TRANSFORMAÇÕES GEOMÉTRICAS	23
CAPÍTULO 3. MÉTODO PROPOSTO	28
3.1. PARÂMETROS DAS TRANSFORMAÇÕES GEOMÉTRICAS	29
3.2. O PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO	31
CAPÍTULO 4. APLICAÇÃO DO MÉTODO E RESULTADOS.....	33
4.1. O PRIMEIRO CENÁRIO HIPOTÉTICO CRIADO.....	33
4.1.1. Mapa de predição de distribuição de doses	34
4.1.2. Medidas de campo	35

4.2 APLICAÇÃO DO MÉTODO AO PRIMEIRO CENÁRIO	36
4.2.1 Definindo as posições para as medidas em campo	36
4.2.2. Otimização do PSO.....	38
4.2.3. Usando matriz de correção em projeções futuras	48
4.3. O SEGUNDO CENÁRIO HIPOTÉTICO CRIADO.....	58
4.3.1. APLICAÇÃO DO MÉTODO AO SEGUNDO CENÁRIO	58
CAPITULO 5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	71
Referências	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama esquemático de um SCA.	13
Figura 2 - A partícula observando o espaço de busca num problema de otimização.....	20
Figura 3 - Movimento da partículas do PSO	22
Figura 4 - Ponto de rotação.....	25
Figura 5 - Algoritmo de interpolação – eixo x	26
Figura 6 - Algoritmo de interpolação – eixo y	27
Figura 7 - Distribuição de doses estimada pelo ADS 15 minutos após o início do acidente	34
Figura 8 - Distribuição de doses atual 15 minutos após o início do acidente gerada pelo (ADS)	35
Figura 9 - Posições das medidas de campo plotadas em quadrados brancos sobre o mapa de de distribuição de doses estimadas pelo ADS 15 minutos após o início do acidente.	36
Figura 10 – Valores medidos e previstos em cada posição de medição de campo	38
Figura 11 – Diagrama de blocos simplificado do processo de otimização.....	39
Figura 12 - Experimento #6: fitness média.....	40
Figura 13 - Experimento #6: Melhor Fitness.....	40
Figura 14 - Experimento #9: fitness média.....	41
Figura 15 - Experimento #9: Melhor Fitness.....	41
Figura 16 – Geração do mapa corrigido aplicando transformações otimizadas.	43
Figura 17 – Valores medidos, previstos e corrigidos em cada posição de medição de campo.....	44

Figura 18 – Distribuição de doses corrigidas 15 minutos após o início do acidente.....	45
Figura 19 – Comparação visual entre os mapas (a) original, (b) atual e (c) corrigido (15 minutos após o acidente)	47
Figura 20 – Comparação visual entre os mapas (a) original, (b) real e (c) corrigido (45 minutos após o início do acidente)	49
Figura 21 – Valores atuais e corrigidos para cada posição de campo medida....	50
Figura 22 – Distribuição de doses original estimada pelo ADS 1h e 15 min após o início do acidente.....	51
Figura 23 – Distribuição de doses atual 1h e 15 min após o início do acidente (ADS).....	52
Figura 24 – Distribuição de doses corrigidas 1h e 15 min após o início do acidente	52
Figura 25 – Valores atuais e corrigidos para cada posição de campo medida 1 h e 15 min após o acidente.	53
Figura 26 - Taxas de dose do ciclo 6, com transformações obtidas no mesmo ciclo (experimento #6).....	55
Figura 27 - Taxas de dose do ciclo 6, com transformações obtidas no mesmo ciclo (experimento #9).....	57
Figura 28 - Posições das medidas de campo plotadas em quadrados brancos sobre o mapa de de distribuição de doses estimadas pelo ADS 15 minutos após o início do acidente.....	59
Figura 29 - Situação real simulada pelo ADS 15 minutos após o acidente	60
Figura 30 - Pluma corrigida pelo ADS 15 minutos após o acidente	61
Figura 31 - Valores atuais e corrigidos para cada posição de campo medida	62

Figura 32 - Comparação visual entre os mapas (a) original, (b) real e (c) corrigido (45 minutos após o início do acidente)	64
Figura 33 - Valores atuais e corrigidos para cada posição de campo medida 45 minutos após o acidente.....	65
Figura 34 - Pluma estimada ciclo 6 1h e 15 minutos após o acidente (visualizada pelo operador).....	67
Figura 35 - Pluma real ciclo 6 1h e 15 minutos após o acidente	67
Figura 36 - Pluma corrigida no ciclo 6 1h e 15 minutos após o acidente (com transformadas do ciclo 6).....	68
Figura 37 - Pluma corrigida no ciclo 6 1h e 15 minutos após o acidente (com transformadas do ciclo 2).....	68
Figura 38 - Grafico ciclo 6.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Taxas de doses previstas versus atuais nos pontos escolhidos pelo tomador de decisões.....	37
Tabela 2 - Resumo de experimentos computacionais.....	39
Tabela 3 - Parâmetros de transformação encontrados pelo PSO	42
Tabela 4 – Valores previstos, medidos e corrigidos.	43
Tabela 5 - Discrepância dos mapas estimados e corrigidos para o mapa real	45
Tabela 6 - Valores corrigidos, medidos e previstos para 1 h e 15 minutos após o acidente	54
Tabela 7 - Valores corrigidos, medidos e previstos para o ciclo 6 com transformações obtidas no mesmo ciclo (experimento #6)	56
Tabela 8 - Valores corrigidos, medidos e previstos para o ciclo 6 com transformações obtidas no mesmo ciclo (experimento #9)	58
Tabela 9 - Valores corrigidos, medidos e previstos 15 minutos após o acidente	62
Tabela 10 - Valores corrigidos, medidos e previstos 45 minutos após o acidente	66
Tabela 11 – Valores aplicados ao o ciclo 6	70

LISTA DE SIGLAS, ACRÔNIMOS E DEFINIÇÕES

ADS – Atmospheric Dispersion Systems

CNAAA – Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto

IRSN – Institute for Radiological Protection and Nuclear Safety

NPP – Nuclear Power Plant

PSO – Particle Swarm Optimization

RASTEP – Rapid Source Term Prediction

SCA – Sistema de Controle Ambiental

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

1.1. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA E CONTEXTUALIZAÇÃO

A estimativa do termo fonte devido a acidentes nucleares severos em uma usina nuclear é uma tarefa muito complexa. A usina encontra-se em condições que extrapolam aquelas concebidas durante seu projeto; os instrumentos podem apresentar falhas se tornando imprecisos ou errôneos; mudanças rápidas e inesperadas no status da usina podem ocorrer tornando a progressão do acidente imprevisível (MCKENNA e GIITTER, 1988). Portanto, um elevado grau de imprecisão é esperado nas estimativas do termo fonte sob situações de acidentes severos. Além disso, as medições das estações meteorológicas próximas à usina, podem também ter sido afetadas e as informações apresentarem erros ou imprecisões.

As tomadas de decisão com relação à proteção radiológica da população nas possíveis áreas afetadas pelo acidente são norteadas por uma estimativa da distribuição espacial de doses nessas áreas. Para isso, um modelo de dispersão atmosférica de radionuclídeos é utilizado. Este modelo, por sua vez, requer como parâmetros de entrada, o termo fonte e do campo de vento (gerado a partir de informações meteorológicas). Logo, se tais informações apresentam erros e imprecisões, a estimativa de doses também será afetada.

A fim de melhorar as estimativas de dose ao público em geral e melhor nortear as tomadas de decisão, diversas abordagens baseadas em medidas de campo para melhor estimar ou corrigir o termo fonte tem sido investigadas. Algumas delas são muito simples, como considerar uma correlação linear entre as medidas de campo e o

termo fonte (ATHEY, BRANDON e RAMSDELL, 2013). Neste caso, aplica-se um fator de proporcionalidade ao termo fonte, baseado na razão entre valor medido e valor inicialmente estimado. O problema deste método é que, em situações reais, a correlação é frequentemente não linear.

Outras abordagens mais complexas e elaboradas propõem resolver o problema inverso que visa caracterizar o termo fonte atual com base em medições de campo. Algumas delas têm sido aplicadas a modelos de poluição atmosférica em geral (CHOW ET al 2008) (ZHENG e CHEN, 2010).

(CHOW ET al 2008) propuseram resolver um problema inverso para estimar a dispersão da pluma em ambientes urbanos usando medidas de concentração obtidas na direção do vento e modelos de Simulação conhecidos. Segundo os autores, o método é muito demorado e precisa de horas para ser executado em um cluster de computador.

(ZHENG e CHEN, 2010) propuseram um método também baseado em medições obtidas na direção do vento. Eles formulam um problema de otimização a ser resolvido por um método de busca de padrões (Pattern Search), a fim de prever características da fonte de liberação de materiais perigosos e suas concentrações. Os cálculos indicam que este método pode conseguir soluções ótimas em um tempo relativamente curto.

Devido à complexidade de se estimar o Termo Fonte em uma usina nuclear, onde há um grande número de radionuclídeos possíveis e de características de liberação, esse tipo de abordagem tem sido utilizada na fase pós-acidente e, geralmente, em escala continental, o que permite ter mais tempo para efetuar os cálculos (DELLE MONACHE, KOSOVÍĆ, *et al.*, 2008). Delle Monache et al (2008)

destacaram a necessidade muitas horas de processamento em um cluster de computadores para executar o problema inverso proposto.

Considerando que se, mesmo com toda a complexidade na estimativa do termo fonte devido a acidentes nucleares severos, fosse possível calcular uma boa correção/estimativa para o mesmo, ainda assim, outras possíveis imprecisões em outros módulos do modelo de dispersão atmosférica (como transporte e difusão atmosférica ou campo de vento, por exemplo) não estariam sendo corrigidas.

1.2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A previsão de dose recebida por um indivíduo à uma certa distância da usina depende diretamente do conhecimento do termo fonte. O diagnóstico preciso do acidente ocorrido, fornecido pelo operador da usina, é fundamental para as tomadas de decisão, por parte das autoridades responsáveis, definidas no plano de emergência da usina e para a seleção da expressão a ser usada para o cálculo do termo fonte.

Alguns trabalhos a respeito dos métodos para correção do termo fonte e da estimativa da dispersão de radionuclídeos na atmosfera após um acidente nuclear foram estudados. No trabalho de (DELLE MONACHE, KOSOVIC, *et al.*, 2008) o principal problema se caracteriza pelas incertezas dos valores da concentração de poluentes obtidos pelos modelos de dispersão atmosférica após um incidente em escala continental. Uma metodologia para resolver o problema inverso é proposta para reconstruir parâmetros de fontes desconhecidas a partir de um conjunto de medidas conhecidas em um momento específico após a liberação. O estudo tem como base um acidente nuclear ocorrido na Espanha em maio de 1998 próximo a Algeciras. Foi

gerado um algoritmo a partir de um modelo aplicado para dispersão em casos de sucesso conhecidos, baseado no *Bayesian inference combined with a MCMC procedure*. Os dados da dispersão são calculados pelo modelo *Lagrangian Operational Dispersion Integrator (LODI)*, desenvolvido pela *National Atmospheric Release Advisory Center (NARAC)*.

Outro trabalho apresentado por (ZHENG e CHEN, 2010) no artigo *Back-calculation of the strength and location of hazardous materials releases using the pattern search method*, onde é avaliada a concentração de gases tóxicos levando em consideração o movimento da pluma e a medição da concentração dos gases em uma sequência de sensores proporcionalmente distribuídos em grids em torno da origem da liberação considerando também o campo de vento e a dispersão. A concentração de poluentes calculada é gerada a partir do modelo gaussiano de puff e o problema inverso é modelado a partir da busca do ponto mínimo da função objetivo por um método padrão de busca (o qual é explicado e definido no artigo) através da soma do erro médio quadrático entre a concentração calculada e a medida. Xiaoping Zheng e Zengqiang Chen em (ZHENG e CHEN, 2011) no artigo (*Inverse calculation approaches for source determination in hazardous chemical releases*), fazem uma comparação do modelo inverso de cálculo da fonte de eliminação de gases químicos tomando como base os métodos probabilísticos e de otimização proveniente de acidentes ou mesmo ataques terroristas. O estudo mostra que o uso dos modelos de otimização é mais eficiente devido a falta de informação suficiente a respeito de fontes desconhecidas e refletem uma necessidade urgente para o desenvolvimento de detectores de alta precisão e mais pesquisas de técnicas de transmissão de dados, a fim de garantir a validade das abordagens feitas no trabalho.

Outra abordagem apresentada por (YEE, 2012) foi o modelo de inferência Bayesiana, pelo cálculo inverso da dispersão para definição de um número desconhecido de fontes de liberação. No trabalho são usados método probabilísticos como o *reversible-jump Markov chain Monte Carlo (RJMCMC)*. Através de um experimento foi possível calcular pelo modelo inverso a quantidade exata das fontes de liberação de gás detectados por um vetor de sensores espalhados em um grid na direção esperada do vento na região.

O trabalho apresentado por (CHOW et al, 2008) segue a mesma linha apresentado por (YEE, 2012) e permite determinar a localização de fontes e a intensidade da liberação de gases tóxicos por esta em uma área urbana (Oklahoma City), com base em medições da concentração na direção do campo de vento, porém a determinação deste se complica pela presença de edifícios que podem desviar o fluxo em direções inesperadas. O que se destaca no trabalho é um método estatístico robusto inverso que tem bom desempenho mesmo sob as condições como as citadas acima. Foi utilizado modelos estocásticos com base em uma amostragem obtida pelo método Markov chain Monte Carlo (MCMC), para uso com um código de alta resolução para a dinâmica de fluidos computacionais. A abordagem estocástica utilizada foi a mesma já aplicada em outros projetos de dispersão.

O trabalho de (CHINO, NAKAYAMA, et al., 2011) tem como objetivo calcular a quantidade de Iodo e Césio eliminados no acidente de Fukushima no período de 12 de março a 5 de abril de 2011 através da comparação de dados estimados dos sites do *Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT)*, uma base de dados robusta com amostra de resultados obtidos para o acidente. As diferenças entre o que é medido e o que é calculado foi simplesmente ajustado, e as taxas de liberação ainda possuem erro de fator 5 no mínimo, o que

representa um erro muito grande. Em outro estudo apresentado (TERADA, KATATA, *et al.*, 2012) é apresentado a comparação da evolução da pluma com o depósito de iodo e césio após o acidente nuclear de Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant, levando em consideração medidas feitas no ambiente com o que é calculado pelos sistemas para o termo fonte, com o objetivo de verificar a precisão destes. O estudo permite concluir que para as estimativas feitas sobre a terra, o que é medido está de acordo com o que é estimado, porém sobre o oceano, não é possível verificar.

Os trabalhos apresentados por (AGRAWAL, 2015), (TERADA, KATATA, *et al.*, 2012) e (KNOCHENHAUER, SWALING e ALFHEIM, 2012) apresentam uma ferramenta probabilística para melhor informar os usuários e melhorar a gestão de emergências fora da usina em cenários de acidentes nucleares severos o RASTEP. No trabalho de (KNOCHENHAUER, SWALING e ALFHEIM, 2012) a saída é um conjunto de possíveis termos fontes com probabilidades associadas. O RASTEP consiste basicamente em duas partes: o modelo BBN usado para prever os estados da planta e os locais de liberação, e a definição do termo fonte (altura, composição, quantidade, tempo, etc.), no trabalho de (DEDDA, 2013), é explorado a integração de um código determinístico que rode mais rápido com o RASTEP, a fim de fazer as previsões mais realistas. O software MARS, desenvolvido por Fauske & Associates (FAUSKE, 2014), foi escolhido como o melhor candidato para este propósito. Estudos da literatura, juntamente com entrevistas com especialistas foram realizados a fim de identificar o melhor processo de vinculação. Conclui-se a partir do estudo que este método pode ser usado para melhorar o RASTEP e é viável para aplicação no curto prazo. No trabalho de (AGRAWAL, 2015) o modelo BBN sozinho não é o suficiente para o uso em locais em condições de alta tensão por pessoas que não são especialistas

e sugere um software que junto aos modelos já criados forneça uma interface e funcionamento interno que resolva este problema.

(RODRIGUEZ, ANNUNZIO, *et al.*) consideram a possibilidade da liberação accidental ou intencional de material: Química, biológica, nuclear ou radioativo (CBRN) na atmosfera e indica a importância do cálculo do termo fonte a partir da medição de concentração por sensores em campo e usa em seu experimento dados obtidos de sistemas das usinas para o termo fonte e usa um Algoritmo Genético (não especifica qual) para gerar as soluções possíveis e as compara através de uma função de custo que é logarítmica na concentração. No artigo de (RODRIGUEZ, HAUPA e YOUNGB, 2011) citado por (RODRIGUEZ, ANNUNZIO, *et al.*) os autores indicam que o GA teve sucesso não só no cálculo do termo fonte, como também em nos parâmetros meteorológicos como o campo de vento com o uso do cálculo inverso e indica que o sucesso só é possível a partir das concentrações máximas.

1.3. OBJETIVO

O objetivo principal desta tese é apresentar um novo método para correção das estimativas de distribuição de dose devido a liberações radioativas causadas por acidentes severos em usinas nucleares. Diferentemente dos trabalhos encontrados na literatura, o objetivo do método proposto não é corrigir ou estimar o termo fonte. Ao invés disso, o trabalho tem como foco a aplicação de uma correção diretamente no mapa de distribuição espacial de doses (informação primordial na tomada de decisão) com base em medidas de campo. Desta forma, qualquer erro ou imprecisão no modelo de cálculo e seus parâmetros (sejam eles oriundos de uma má estimativa do termo

fonte, dos parâmetros meteorológicos ou instrumentação em geral) estarão sendo contemplados, o que não acontece ao se corrigir apenas o termo fonte.

Como objetivos específicos, pode-se destacar:

- i) Investigar os tipos de transformações a serem consideradas;
- ii) Investigar a capacidade do PSO em estimar as transformações ótimas
- iii) Analisar a aplicação da técnica em um problema exemplo

1.4. RELEVÂNCIA

As Usinas da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto Angra contam hoje com o Sistema de Controle Ambiental (SCA) como ambiente de tomada de decisões em casos de acidentes nucleares com liberação de material radioativo. O SCA é capaz de estimar termo fonte para os acidentes postulados, calcular a dispersão atmosférica dos radionuclídeos e fazer as estimativas de distribuição de doses no ambiente. Entretanto, o mesmo está susceptível a toda imprecisão inerente ao modelo de cálculo e à instrumentação durante acidentes nucleares, especialmente os acidentes severos.

Daí surge a relevância tecnológica e social desta tese, que poderia resultar em ganhos importantes com relação à segurança nuclear, no que diz respeito à dispersão atmosférica de radionuclídeos.

A relevância científica está na investigação de uma nova forma de abordar o problema de melhorar a estimativa de dose baseada em medidas de campo, que possibilitará que as imprecisões decorrentes do modelo físico de uma forma geral

(cálculos de termo fonte, campo de vento, dispersão e dose) sejam corrigidas e não apenas aquelas decorrentes da estimativa do termo fonte.

1.5. ORIGINALIDADE

Os métodos para correção das estimativas de dose baseados em medidas de campo, encontrados na literatura, buscam corrigir ou recalcular o termo fonte de forma que as simulações reflitam melhor a realidade (CHOW et al, 2008) (DELLE MONACHE, KOSOVÍĆ, *et al.*, 2008) e (MCKENNA e GIITTER, 1988). Diferentemente destes métodos, a presente tese propõe um método que não foca na correção do termo fonte. Ao invés disso, busca a fazer a correção diretamente nas distribuições de dose (mapas de dose), que é o resultado final calculado por um sistema de dispersão atmosférica de radionuclídeos e instrumento fundamental na tomada de decisão durante uma emergência.

Tendo foco no resultado final a ser entregue ao tomador de decisão, quaisquer imprecisões do modelo de cálculo como um todo (termo fonte, campo de vento, dispersão atmosférica ou instrumentação), estariam contempladas na correção.

Além do objetivo fim, que é a correção do mapa de dose, esta tese ainda propõe um método inovador para atingi-lo. A descoberta das transformações ótimas a serem aplicadas ao mapa de dose utilizando-se o algoritmo de otimização por enxame de partículas (PSO) também é um aspecto original da tese.

1.6. METODOLOGIA

Inicialmente foram estudados trabalhos relacionados com a correção dos modelos de dispersão baseados em medidas de campo. Todos os trabalhos encontrados focavam na correção ou estimativa do termo fonte baseado nas medidas. Alguns apresentavam métodos simples como a aplicação de uma correção proporcional. Outros envolviam a solução de um problema inverso para a uma melhor estimativa do termo fonte. Baseado na tendência apresentada na literatura, buscou-se inicialmente desenvolver um programa que resolvesse o problema inverso, utilizando-se PSO. Resultados preliminares mostraram que, para problemas simplificados, o método seria plausível, entretanto, devido à real complexidade do problema de dispersão de radionuclídeos devido à um acidente nuclear (uma grande quantidade de radionuclídeos e características da liberação) o método poderia se tornar impraticável.

A partir deste ponto iniciou-se o estudo de uma nova proposta. A ideia principal seria aplicar uma correção diretamente ao mapa de doses gerado pelo sistema de dispersão atmosférica.

Foi proposto, então, a utilização de transformações geométricas diretamente aplicadas ao mapa de distribuição de doses gerados pelo SCA.

Para avaliar o método, o sistema de dispersão atmosférica utilizado na CNAAA foi utilizado para simular os mapas de dose dos casos exemplo estudados no decorrer desta tese.

O método foi aplicado aos casos exemplo. Os resultados foram, então, analisados e são, aqui, comentados.

1.7. ORGANIZAÇÃO DA TESE

O restante deste trabalho é subdividido da seguinte forma. O capítulo 2 apresenta uma visão geral da dispersão atmosférica de radionuclídeos e do cálculo da distribuição de dose. O capítulo 3 apresenta o método proposto. O capítulo 4 mostra alguns resultados experimentais e, finalmente, as conclusões e observações finais são apresentadas no capítulo 5.

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. PREDIÇÃO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA DE RADIONUCLÍDEOS

O termo fonte e sua consequente dispersão através da atmosfera são estimados por meio de sistemas dedicados, aqui denominados Sistemas de Dispersão Atmosférica (*Atmospheric Dispersion Systems - ADS*), que compreendem implementações computacionais de modelos físicos e consideram informações específicas da Central Nuclear. O SCA, ADS utilizado nas CNAAA é composta basicamente por 4 módulos:

- i) Módulo de Previsão do Termo Fonte;
- ii) módulo Campo de Vento;
- iii) módulo Dispersão de Plumas (incluindo cálculos de dose) e
- iv) módulo de Projeção de Plumas (incluindo cálculos de dose).

A Figura 1 mostra um diagrama esquemático simplificado de SCA.

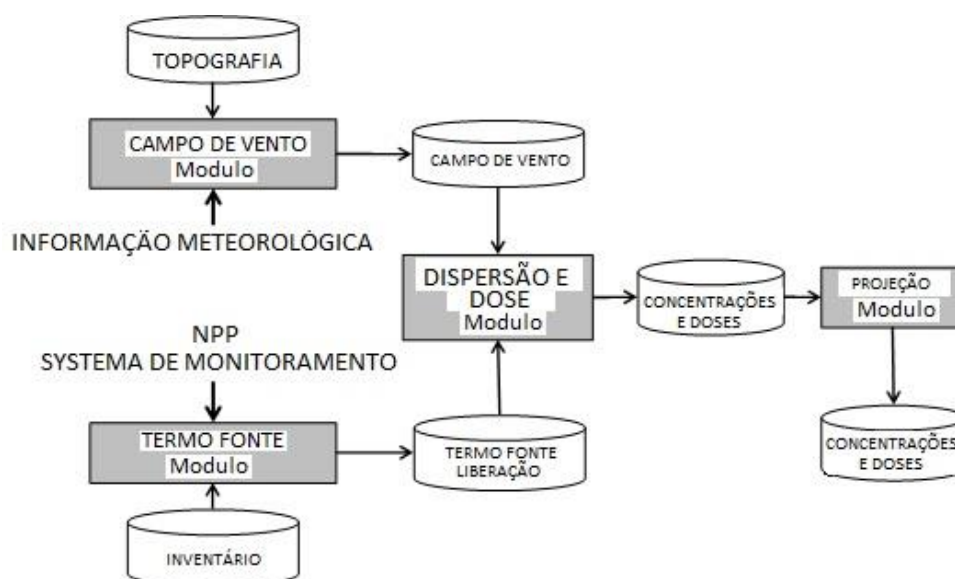


Figura 1 - Diagrama esquemático de um SCA.

O módulo de Termo Fonte estima a quantidade de material nuclear liberado e a sua taxa de liberação (Termo Fonte). O módulo Campo de Vento utiliza informações topográficas e meteorológicas para produzir o campo de vento. Em seguida, o módulo de Dispersão de Plumas usa as saídas dos módulos Termo Fonte e do Campo de Vento para simular a dispersão de plumas e calcular as doses equivalentes. O módulo de Projeção de Plumas, faz projeções da dispersão da pluma em etapas de tempo futuro.

2.2. SISTEMA DE CONTROLE AMBIENTAL (SCA)

O Sistema de Controle Ambiental (SCA) é composto por um conjunto de módulos como citado anteriormente neste documento. Segundo a (NENP-WEBMASTER, 2016) os sistemas de controle e instrumentação de uma NPP integram informações e fazem ajustes automáticos para o melhor funcionamento para a operação da Usina e ao longo dos anos novas implementações digitais vem sido implementadas a fim de melhorar todo o processo de operação das plantas. O SCA faz parte deste cenário e tem como objetivo principal, ser uma ferramenta para o auxílio

na tomada de decisão, caso haja a necessidade de se realizar uma evacuação, em virtude de um possível acidente nuclear com liberação de radionuclídeos para o meio ambiente.

Em situações de emergência o fator tempo é primordial, as tomadas de decisões devem ser feitas de forma rápida e precisa, tendo como base informações confiáveis. O SCA passa aos tomadores de decisões, informações importantes ao que se refere a situação atual, em termos das consequências para a população abrangida pela área delimitada pelo sistema. Trata-se de um sistema que deve ser usado fundamentalmente em situações de emergência ou para simulação de treinamento destas situações.

O SCA pode ser ativado de duas maneiras: de forma automática e de forma manual.

Na forma automática o SCA é ativado no modo de operação em emergência toda vez que uma das seguintes situações ocorrerem:

- Sinal de desarme do reator;
- Sinal de Injeção de segurança;
- Alarme de alto nível de radiação em qualquer um dos monitores de radiação;
- Alarme de alta atividade nas salas dos compressores do sistema de tratamento de rejeitos gasosos;
- Baixa pressão nos tanques do sistema de tratamento de rejeitos gasosos;
- Alta pressão no tanque de alívio do pressurizador (pressão de ruptura do disco)

Já na ativação manual, o SCA pode ser ativado tanto no modo de operação de emergência, no caso de um acidente real ou no modo de operação de simulação, para treinamento e/ou análise.

No modo de operação em emergência, é considerado a existência de um acidente real e só pode ser desativado pelo pessoal da Proteção Radiológica, com ordem expressa da Gerência de Situações de Emergência (FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A., 1987). Já no caso do modo de operação em simulação, o sistema simula um acidente, mas pode ser desativado a qualquer tempo.

O objetivo do SCA, consiste na avaliação da dose radiológica no meio ambiente e o cálculo da dose e da previsão de dose recebida por um indivíduo em um determinado ponto afastado da fonte geradora de radiação que, no caso de um acidente nuclear, seria a própria usina nuclear.

Para que a dose radiológica neste ponto seja devidamente calculada, é necessário determinar como a concentração dos radionuclídeos liberados no acidente variam espacialmente e temporalmente na atmosfera.

Por sua vez, para computo da distribuição espacial e da evolução temporal do processo de transporte dos radionuclídeos emitidos, é necessário que seja calculada a quantidade de material radioativo liberado durante o acidente e como foi o transporte e difusão deste material desde a sua origem até o seu destino.

Como o transporte e difusão ocorrem em meio atmosférico é necessário levarmos em consideração as variações com o tempo das condições meteorológicas como a velocidade e a estabilidade do vento.

Atualmente o SCA leva em consideração um intervalo de tempo de 15 minutos denominado de ciclo. Em cada ciclo, as condições meteorológicas são mantidas constantes para que sejam efetuados os cálculos necessários para a avaliação da dose radiológica em um determinado ponto,

A cada ciclo do sistema os seguintes cálculos são realizados:

1. Avaliação da taxa de liberação de radionuclídeos para a atmosfera;
2. Determinação do campo de velocidade e estabilidade do vento;
3. Cálculo do transporte e difusão do material radioativo na atmosfera;
4. Avaliação da distribuição espacial da dose; e
5. Cálculo da dose decorrente de projeções do ciclo atual.

A avaliação da taxa de liberação dos radionuclídeos para a atmosfera, depende fundamentalmente do tipo de acidente; cada acidente em particular possui suas próprias características que interferem na quantidade dos radionuclídeos liberados.

A concentração inicial de cada radionuclídeo disponível para liberação depende do acidente ocorrido e do tipo de radionuclídeo considerado identificando-se os caminhos pelos quais essa liberação pode ocorrer.

Por conta destas particularidades, o operador da usina ao diagnosticar o acidente ocorrido, deve informar ao sistema qual o acidente em questão para que a concentração total liberada no ciclo possa ser calculada pelo modelo de termo fonte, fazendo um balanço da atividade através de cada caminho possível compatível com o acidente, de acordo com o status dos diversos componentes dos caminhos.

A taxa de liberação média do ciclo é calculada, dividindo-se a atividade total liberada no ciclo, pela quantidade de bufadas liberadas no mesmo ciclo. O valor da taxa de liberação média é tomado como a atividade liberada por uma bufada no ciclo.

Uma vez calculada a taxa de liberação média por ciclo, o SCA deve então calcular a distribuição espacial do campo de velocidade do vento baseado nos valores médios do ciclo obtidos nas torres meteorológicas, da velocidade do vento (magnitude e direção). Para tanto, a topologia da região ocupa uma malha fixa tridimensional de $67 \times 43 \times 8$ células com $250\text{m} \times 250\text{m}$ no plano e na vertical possuem uma variação que não é levada em consideração neste trabalho.

O campo de vento é tornado consistente em massa após um processo de extrapolação e interpolação a partir dos valores fornecidos, através de um processo iterativo que elimina as divergências do campo interpolado.

Com o campo de vento devidamente conhecido pelo processo acima descrito e distribuído na malha tridimensional, o cálculo do transporte e da difusão dos radionuclídeos na atmosfera é então iniciado e possui um modelo de bufadas tridimensional com trajetória lagrangeana variável e difusão gaussiana.

Cada bufada possui uma taxa de liberação média que foi calculada pelo modulo termo fonte e é liberada e transportada durante um intervalo de advecção, cujo valor é definido a cada ciclo, com a velocidade local do campo de vento no ponto que corresponde ao início do intervalo de advecção.

A contribuição de uma bufada para a concentração em cada ponto da malha é determinada pelo modelo gaussiano ao longo da trajetória percorrida pela bufada durante o ciclo e a concentração em cada ponto da malha é o somatório das

contribuições médias das bufadas naquele determinado ponto, durante o ciclo que estiver sendo processado.

Os seguintes efeitos físicos são considerados no modelo de transporte e difusão (COPPE/UFRJ - NUCLEAR, LABORATÓRIO DE ANÁLISE E SEGURANÇA, 1987).

- Efeito de esteira (“building wake”) causado pelos edifícios da usina;
- Elevação da pluma (empuxo térmico e/ou quantidade de movimento devido à velocidade de saída do material liberado);
- Depleção seca (deposição de particulados e iodos no solo);
- Depleção molhada (deposição de particulados e iodos em caso de chuva durante o transporte atmosférico);
- Decaimento radioativo;
- Reflexão no solo;
- Variação do coeficiente de dispersão quando a trajetória da bufada atravessa regiões com diferentes classes de estabilidade.

Ao final de cada ciclo, são geradas tabelas que possuem a concentração média de iodos e particulados a nível do solo e para gases nobres a nível do solo, 50m, 125m e 275m.

Com base nas tabelas geradas, são calculadas a taxa de dose média no ciclo e as doses acumuladas desde o início do acidente para a tireoide e pulmão, devido à inalação de iodos, particulados e gases nobres e para o corpo inteiro devido à imersão na nuvem onde somente existe a contribuição dos gases nobres usando-se o modelo de pluma finita.

Assumindo a persistência das condições do ciclo atual, tais como condições meteorológicas e taxa de liberação dos radionuclídeos para a atmosfera, o SCA fornece projeções para uma e duas horas, para as taxas de dose média e doses acumuladas, contados a partir do final do ciclo atual.

2.3. OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS (PSO)

Otimização por enxames de partículas (PSO) (KENNEDY e EBERHART, 1995) é um algoritmo de otimização inspirado pelo comportamento de enxames biológicos e aspectos de adaptação social. No PSO, é simulado um enxame de estruturas compostas por candidatos à solução, chamados "partículas". Elas se movem em um espaço n-dimensional procurando por regiões ótimas.

As partículas são atraídas por regiões de alto valor de adaptação, conforme ilustrado na Figura 2 (KAEWKAMNERDPONG e BENTLEY, 2005).

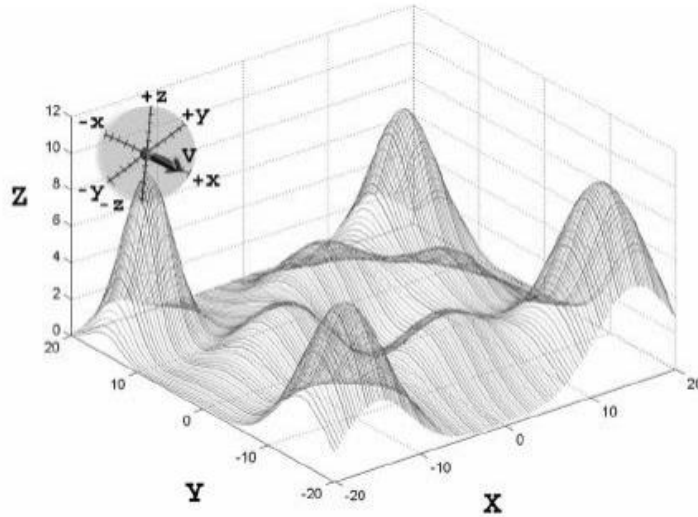


Figura 2 - A partícula observando o espaço de busca num problema de otimização
 Fonte: (KAEWKAMNERDPONG B., 2005)

A “posição” da partícula representa a própria candidata a solução, enquanto a topologia do espaço de busca é dada pela função objetivo do problema. A cada partícula também é atribuída uma “velocidade”, onde se encontram as informações de direção e taxa de mudança de posição em função do “tempo”, e o atributo de performance (ou adequação), obtido pela avaliação da função objetivo na posição da partícula. A mudança da posição da partícula e de sua velocidade é guiada por sua própria experiência (informação histórica das regiões boas e ruins pelas quais a partícula já passou), bem como pela observação de seus vizinhos bem sucedidos.

Fazendo com que $\vec{X}_i(t) = \{x_{i,1}(t), \dots, x_{i,n}(t)\}$ e $\vec{V}_i(t) = \{v_{i,1}(t), \dots, v_{i,n}(t)\}$ sejam respectivamente, a posição (a própria solução candidata) e a velocidade da partícula i no tempo t , em um espaço de busca n -dimensional. Considere também, $\overrightarrow{pBest}_i(t) = \{pBest_{i,1}(t), \dots, pBest_{i,n}(t)\}$, como sendo a melhor posição já encontrada

pela partícula i até o tempo t e $\overrightarrow{gBest}_i(t) = \{gBest_{i,1}(t), \dots, gBest_{i,n}(t)\}$ a melhor posição já encontrada na vizinhança até t .

Segundo (WAINTRAUB, 2009), o PSO comparado a outras técnicas de computação evolucionárias, localiza rapidamente a região do ótimo, mas uma vez dentro desta região, ele pode enfrentar dificuldade em ajustar o seu incremento de velocidade para prosseguir numa busca mais refinada. Para resolver este problema introduz-se um peso para a velocidade anterior da partícula, denominado peso inercial, w , cuja regra é considerada crítica para a convergência do PSO. Com isto, a equação da velocidade da partícula, anteriormente descrita pela equação:

$$v_{i,n}(t+1) = v_{i,n}(t) + c_1 \cdot r_1 \cdot (pBest_{i,n}(t) - x_{i,n}(t)) + c_2 \cdot r_2 \cdot (gBest_{i,n}(t) - x_{i,n}(t)) \quad (1)$$

passa a ser:

$$v_{i,n}(t+1) = w \cdot v_{i,n}(t) + c_1 \cdot r_1 \cdot (pBest_{i,n}(t) - x_{i,n}(t)) + c_2 \cdot r_2 \cdot (gBest_{i,n}(t) - x_{i,n}(t)) \quad (2)$$

onde r_1 e r_2 são números randômicos uniformemente distribuídos entre 0 e 1. Os coeficientes c_1 e c_2 são as constantes de aceleração (geralmente chamadas de aceleração cognitiva e social, respectivamente) relativas a \overrightarrow{pBest} e \overrightarrow{gBest} respectivamente. Valores elevados de w promovem a exploração e prospecção

globais, enquanto que valores baixos conduzem a uma busca local. Uma aproximação comumente utilizada para aumentar a performance do PSO, promovendo um balanço entre a busca global e local, consiste em inicializar w com um valor alto e ir decrescendo (linearmente) durante a execução do PSO conforme mostra a Equação:

$$w = \begin{cases} w_{\max} - \frac{w_{\max} - w_{\min}}{iter_{\max}} iter, & iter \leq iter_{\max} \\ w_{\min}, & iter > iter_{\max} \end{cases} \quad (3)$$

onde $iter$ é a iteração corrente e $iter_{\max}$ é o número máximo de iterações.

Através da Figura 3 é possível observar a aplicação de cada um dos termos da equação no movimento das partículas no plano cartesiano.

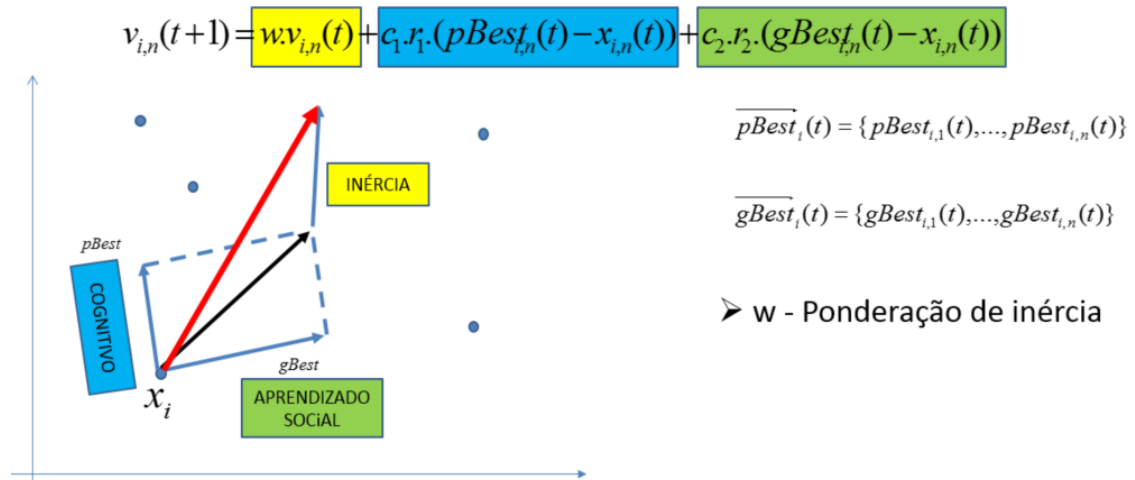


Figura 3 - Movimento da partículas do PSO

Valores muito altos de velocidade podem fazer com que a partícula tente “voar” para fora do espaço de busca. Neste caso, algumas estratégias podem ser utilizadas, como “parar” a partícula nos limites do espaço de busca ou, mais natural e eficiente, refletir a partícula para dentro do espaço de busca.

Tal tratamento, entretanto, pode ocasionar a necessidade de várias reflexões em caso de velocidades muito altas, podendo diminuir a eficiência do PSO. Torna-se adequado, então, uma limitação do valor da velocidade da partícula em um valor máximo (VMAX). Quando a velocidade exceder este limite, ela será fixada em VMAX.

No PSO original, todas as partículas “navegam” por um espaço de busca n -dimensional, delimitado pelos intervalos de variação dos n parâmetros de otimização. O enxame é classificado como sendo de vizinhança global, onde todas as partículas são informadas quando um novo melhor ponto é encontrado no espaço de busca. Denominamos este modelo de PSO-Padrão.

2.4. TRANSFORMAÇÕES GEOMÉTRICAS

O problema discutido neste trabalho envolve diretamente o tratamento de imagens, através de matrizes. A criação e manipulação dessas imagens remete diretamente ao conceito da computação gráfica. Segundo (AZEVEDO e CONCI, 2003) esta é uma ferramenta de concepção de arte, a qual proporciona maior poder de abstração, ajudando na criação de imagens complexas.

Com a união da computação gráfica com a utilização de algoritmos de otimização foi possível a geração das imagens que representam a solução "ótima" para

a tomada de decisão. Todo o processo de transformações lineares de imagens 2D e 3D pode ser feito através da manipulação de matrizes quadradas de 2x2 ou 3x3.

Através da observação das imagens geradas pelo SCA foi possível definir que para este trabalho usaríamos as transformações de: translação, rotação e escala.

A translação de uma imagem é dada pela movimentação de todos os seus pontos nos sentidos x e y no caso do movimento 2D, em T_x e T_y unidades onde para cada ponto (x, y) teremos um novo ponto (x', y') que são obtidos a partir de: (AZEVEDO e CONCI, 2003)

$$\begin{aligned}x' &= x + T_x \\ y' &= y + T_y\end{aligned}\tag{4}$$

Segundo (AZEVEDO e CONCI, 2003) quando um objeto não está definido na origem do sistema de coordenadas (como é o caso da pluma, na qual tomamos como ponto de rotação o posicionamento da usina no mapa conforme Figura 4) é necessário aplicar a translação do objeto para a origem da coordenada, a rotação e novamente a translação inversa. Outro ponto importante para se destacar é o cuidado que deve se ter com os pontos da matriz após a rotação que podem assumir valores fora da faixa da mesma, provocando erro nos cálculos.

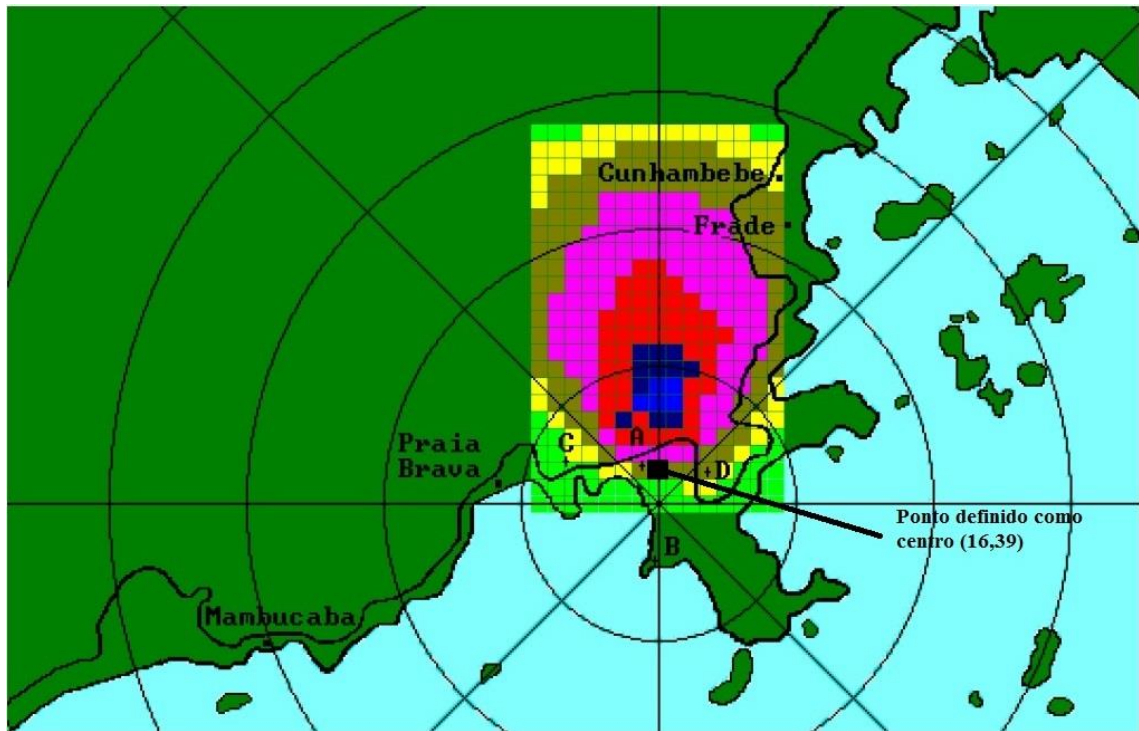


Figura 4 - Ponto de rotação

Ainda segundo (AZEVEDO e CONCI, 2003) as expressões de rotação podem ser descritas utilizando diretamente a multiplicação do vetor de coordenadas pela matriz:

$$M = \begin{vmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{vmatrix}$$

A transformação de escala representa a alteração do tamanho do objeto em x e/ou em y, fazendo para tanto a multiplicação do vetor por fatores como S_x e S_y onde temos:

$$x' = x \times S_x \text{ e } y' = y \times S_y$$

Esta operação segundo (AZEVEDO e CONCI, 2003) pode ser representada de forma matricial por:

$$\begin{bmatrix} x & y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_x & 0 \\ 0 & S_y \end{bmatrix}$$

Após a aplicação de todas as operações de transformação, a matriz gerada que representa a pluma pode apresentar espaços vazios os quais devem ser interpolados para que possamos ter uma matriz completa. Para tanto foi desenvolvido o seguinte algoritmo.

Verifica-se se houve mudança de angulo ou na escala em x (S_x ou θ)
Encontra os espaços vazios em x
Calcula-se o fator de interpolação para cada espaço
Preenche os valores em x.
Verifica-se se houve mudança de angulo ou na escala em y (S_y ou θ)
Encontra os espaços vazios em y
Calcula-se o fator de interpolação para cada espaço
Preenche os valores em y.
Gera-se uma matriz intermediária com todos os valores.

Figura 5 - Algoritmo de interpolação – eixo x

Repete-se o processo, porém agora em ordem inversa, pois pode haver divergência entre os valores interpolados.

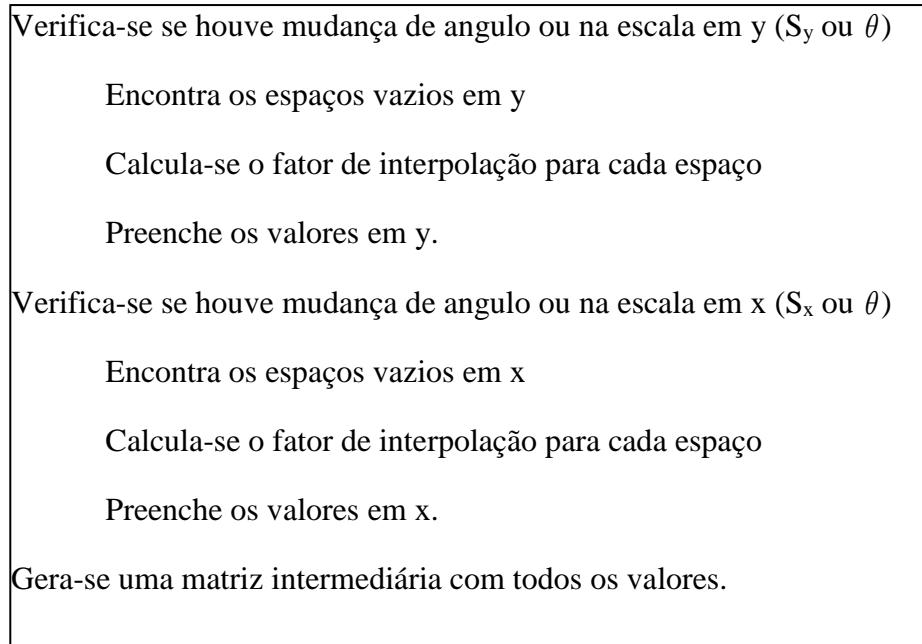


Figura 6 - Algoritmo de interpolação – eixo y

A matriz final interpolada é representada pela média das duas matrizes intermediárias geradas.

CAPÍTULO 3. MÉTODO PROPOSTO

Como já mencionado, as estimativas de doses devido a acidentes severos nas centrais nucleares são altamente imprecisas, isto é: a magnitude e a distribuição espacial das concentrações de radionuclídeos e das doses de radiação estimadas por um ADS podem ser muito diferentes da realidade.

Com a intenção de melhorar as estimativas de doses, muitos métodos baseados em medidas de campo foram propostos. Alguns desses propõem a correção proporcional do Termo Fonte, considerando as medidas de doses de radiação feitas na direção do vento (ATHEY, BRANDON e RAMSDELL, 2013). Estes métodos são bem simples e podem estar sujeitos a erros significantes devido à possível não-linearidade associada. Outras abordagens são mais refinadas e complexas, propondo a solução inversa do problema para ajustar o Termo Fonte a partir das medidas de campo (CHOW et al, 2008) (ZHENG e CHEN, 2010) (DELLE MONACHE, KOSOVIĆ, *et al.*, 2008). Devido à complexidade envolvida, essas abordagens podem não ser eficientes, modelando problemas nucleares de forma mais realista, envolvendo grande número de possíveis radionuclídeos e muitas características possíveis de liberação.

Neste trabalho, propõe-se uma abordagem alternativa mais simples. A ideia é corrigir diretamente o mapa de distribuição de dose (mapa de dose), sem tentar estimar ou corrigir o Termo Fonte. Para isso, propõe-se encontrar uma matriz de transformação, que aplicada a uma dada estimativa original (possivelmente errônea), muda sua forma e intensidade para melhor se adaptar às medições de campo.

O método funciona como descrito a seguir:

- i) dado o mapa de doses estimado pelo ADS (chamado aqui de "mapa original"), um conjunto de pontos de interesse é escolhido para ser medido *in vivo* pela equipe de emergência de campo;
- ii) minimiza-se, então, o erro médio quadrático, E , entre os valores estimados (tomados do mapa de doses calculado pelo ADS) e as medições feitas em campo, ajustando-se os parâmetros da matriz de transformação;

É importante observar que o critério a ser utilizado na escolha do conjunto de pontos a serem medidos vai depender da viabilidade de se fazer as medidas, da capacidade da equipe de emergência, da acessibilidade às coordenadas desejadas, da disponibilidade de equipamentos e talvez outros fatores. Por estes motivos, a discussão destes critérios não é foco deste trabalho.

3.1. PARÂMETROS DAS TRANSFORMAÇÕES GEOMÉTRICAS

Aqui, são consideradas as três transformações geométricas básicas (escala, translação e rotação), bem como um fator de proporcionalidade (para corrigir a intensidade das doses).

$$P' = P \cdot S \cdot R \cdot T \cdot I \quad (5)$$

A equação 5 descreve tais transformações, onde P é um ponto (x, y) no mapa original, P' é o ponto (x', y') transformado (corrigido), S é a matriz de escala, R é a matriz de rotação e T é a matriz de translação. Neste trabalho, consideramos como centro da rotação e da escala em S e R a posição de liberação definida (a localização da Central Nuclear). I é um escalar que fornece um fator de proporcionalidade a ser aplicado para atenuar ou amplificar a intensidade da dose. As equações (6, 7 e 8), descrevem as matrizes de transformação geométrica.

$$T = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ T_x & T_y & 1 \end{vmatrix} \quad (6)$$

$$S = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ T_{-xo} & T_{-yo} & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} S_x & 0 & 0 \\ 0 & S_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ T_{xo} & T_{yo} & 1 \end{vmatrix} \quad (7)$$

$$R = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ T_{-xo} & T_{-yo} & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ T_{xo} & T_{yo} & 1 \end{vmatrix} \quad (8)$$

onde T_x e T_y são translações e S_x e S_y são as escalas referidas para os eixos X e Y respectivamente. θ é o ângulo de rotação. T_{-xo} , T_{-yo} , T_{x+xo} , T_{yo} , provêm a translação de ida e volta para a origem (xo, yo) , permitindo que a rotação e a escalas sejam feitas tendo como base a posição de liberação (ou da Central Nuclear) posição (xo, yo) .

A escolha das transformações foi baseada nos possíveis fenômenos físicos que podem afetar a forma e intensidade do mapa de dose.

A rotação gira a pluma em qualquer ângulo, permitindo uma correção que adapte possíveis discrepâncias com relação à direção do vento para o modelo 2D proposto.

A escala permite que a pluma seja esticada ou alargada de forma a corrigir possíveis discrepâncias com relação à velocidade do vento e/ou elevação da pluma (relacionada com a velocidade e temperatura de liberação).

A translação foi aplicada, fora do movimento de rotação, para que fosse possível, acertar a posição da pluma inteira no mapa dando uma maior flexibilidade para o ajuste da pluma.

A intensidade permite o ajuste das diferenças geradas por erros na estimativa do termo fonte.

3.2. O PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO

Considerando que os pontos P_1 ao P_N foram escolhidos, D_1 ao D_N são os estimados e D'_1 ao D'_N são os valores de doses medidas, o erro obtido após aplicar as transformações no mapa original é dado pela Equação 9.

$$E(I, S_x, S_y, \theta, T_x, T_y) = \frac{(D'_1 - D_1)^2 + (D'_2 - D_2)^2 + \dots + (D'_N - D_N)^2}{N} \quad (9)$$

E o problema de otimização é descrito como a seguir:

Minimizar:

$$E(I, S_x, S_y, \theta, T_x, T_y)$$

Sujeito a:

$$I_{MIN} \leq I \leq I_{MAX}$$

$$\theta_{MIN} \leq \theta \leq \theta_{MAX}$$

$$S_{x,MIN} \leq S_x \leq S_{x,MAX}$$

$$S_{y,MIN} \leq S_y \leq S_{y,MAX}$$

$$T_{x,MIN} \leq T_x \leq T_{x,MAX}$$

$$T_{y,MIN} \leq T_y \leq T_{y,MAX}$$

A solução do problema de otimização é feita através do algoritmo PSO onde a posição da partícula é uma instância de $\vec{X} = \{ I, S_x, S_y, \theta, T_x, T_y \}$. Logo, enquanto o critério de parada (para este problema foi usado um número máximo de iterações) não for alcançado o seguinte loop é executado:

- i) As partículas são avaliadas de acordo com a função objetivo do problema (Eq. 9), e os valores da fitness são atribuídos a cada partícula;
- ii) os valores de \overrightarrow{pBest} e \overrightarrow{gBest} são atualizados;
- iii) as partículas se movem de acordo com as equações de atualização para velocidade e posições (Equações 1 e 2).

CAPITULO 4. ALICAÇÃO DO MÉTODO E RESULTADOS

Para avaliar o método proposto, foram criados dois cenários hipotéticos. No primeiro, o objetivo foi verificar a capacidade do método em corrigir adequadamente o mapa de distribuição de doses, verificar a sua consistência através de diversas execuções do PSO e avaliar os tempos computacionais envolvidos. O segundo cenário é utilizado para confirmar a capacidade do método para diferentes condições atmosféricas e características da liberação. Todos os dados utilizados para esta amostragem foram gerados pelo simulador do SCA, o ADS da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA).

4.1. O PRIMEIRO CENÁRIO HIPOTÉTICO CRIADO

Para descrever o cenário hipotético, foi necessário definir:

i) O mapa de distribuição de doses previsto (calculado pelo SCA), que é a informação disponível ao operador durante o acidente e pode ser incorreta devido à condição severa, para efeito de testes, tabelas e gráficos apresentados neste trabalho, estes serão chamados de valores estimados;

ii) As medidas de campo obtidas pela equipe de emergência. Aqui, esta informação será obtida por outra simulação (também usando o SCA) considerando um termo fonte diferente (simulando a imprecisão na estimativa do termo fonte) e condições meteorológicas (simulando alguma divergência devido a mau

funcionamento de instrumentação meteorológica), para efeito de testes, tabelas e gráficos apresentados neste trabalho, estas serão chamadas de valores medidos;

4.1.1. Mapa de predição de distribuição de doses

O mapa de predição de distribuição de doses (mostrado na Figura 7) utiliza a taxa de doses na tireoide, 15 minutos após o início da liberação, obtido por uma simulação de um hipotético acidente severo com elevada liberação de iodo (entre dezenas de outros radionuclídeos considerados pelo simulador). Nesta simulação um vento de 0^0 (de Sul para Norte) de 2,5 m/s foi considerado como a entrada de dados de instrumentação no ADS. A Figura 7 apresenta a informação exibida para o operador.

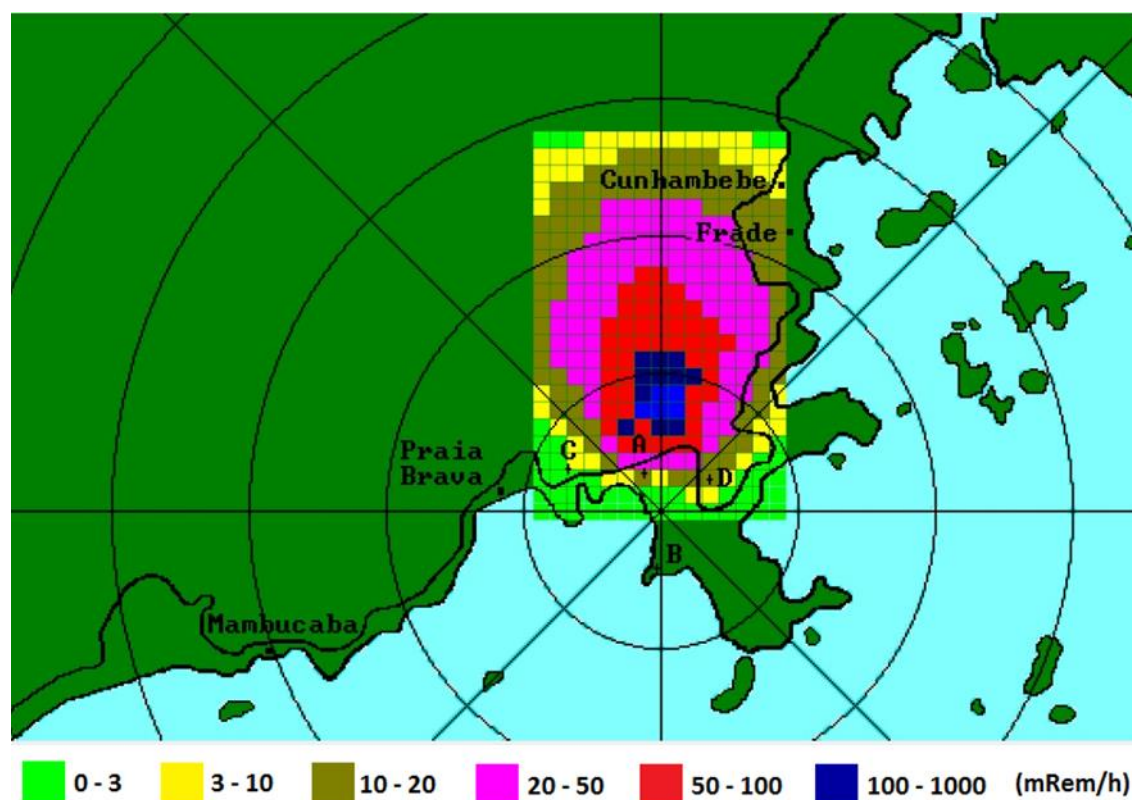


Figura 7 - Distribuição de doses estimada pelo ADS 15 minutos após o início do acidente

4.1.2. Medidas de campo

A fim de tornar as medições reais de campo diferentes do mapa de dose prevista (Figura 7), algumas distorções foram impostas na estimativa do termo fonte e nas condições meteorológicas.

A concentração de iodo foi reduzida quatro vezes (considerando que sob condições de acidente severo, a previsão deve ser superestimada). A direção do vento foi de 100 no sentido do relógio e a velocidade do vento foi ajustada para 3,5 m/s (1 m/s a mais do que a adquirida pelas estações meteorológicas e utilizada na predição). Com tais diferenças, a situação estimada (real) aqui considerada é aquela mostrada na Figura 8.

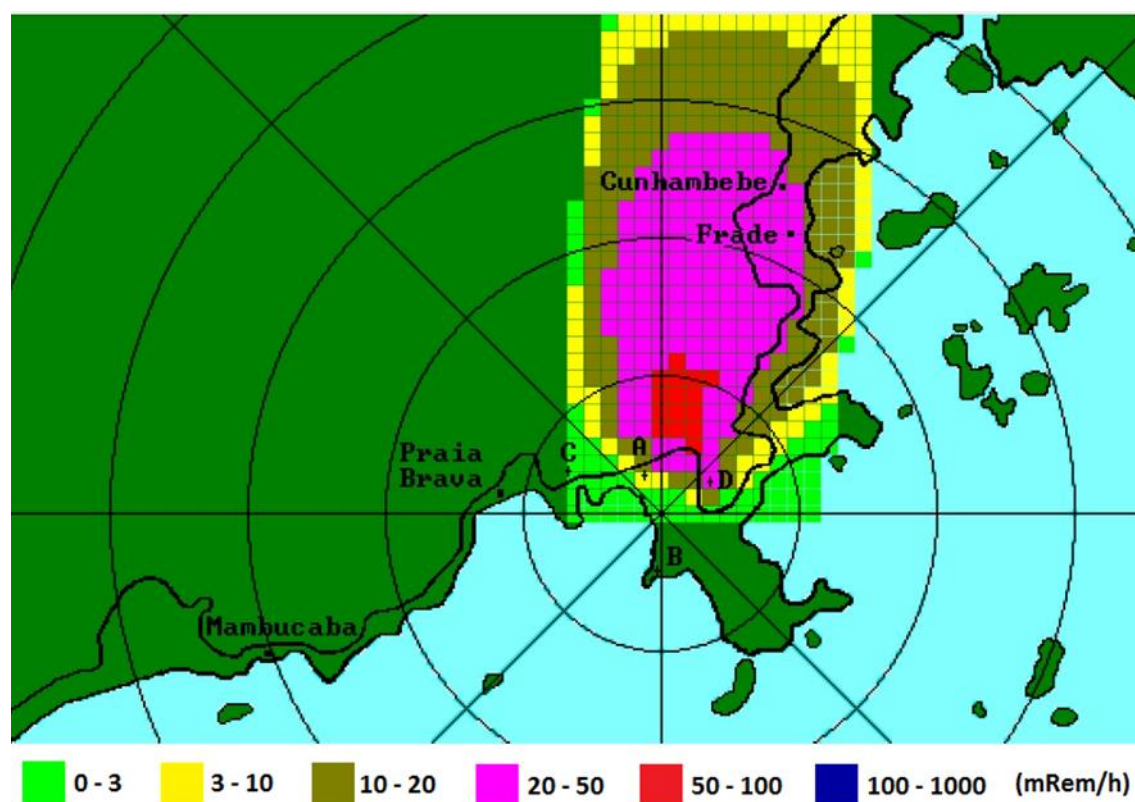


Figura 8 - Distribuição de doses atual 15 minutos após o início do acidente gerada pelo (ADS)

4.2 APLICAÇÃO DO MÉTODO AO PRIMEIRO CENÁRIO

4.2.1 Definindo as posições para as medidas em campo

Observando o mapa de predição de doses (Figura 7), o tomador de decisão escolhe um conjunto de pontos, na direção do vento, para ser medido pela equipe de emergência de campo. Embora o número de pontos e suas posições sejam fundamentais para encontrar uma boa matriz de correção (transformações), este trabalho não tem como objetivo otimizar nem definir um critério para essa escolha. Futuro trabalho vai cuidar dele. O conjunto de pontos escolhidos aqui são mostrados na Figura 9, plotados em quadrados brancos sobre o mapa predito.

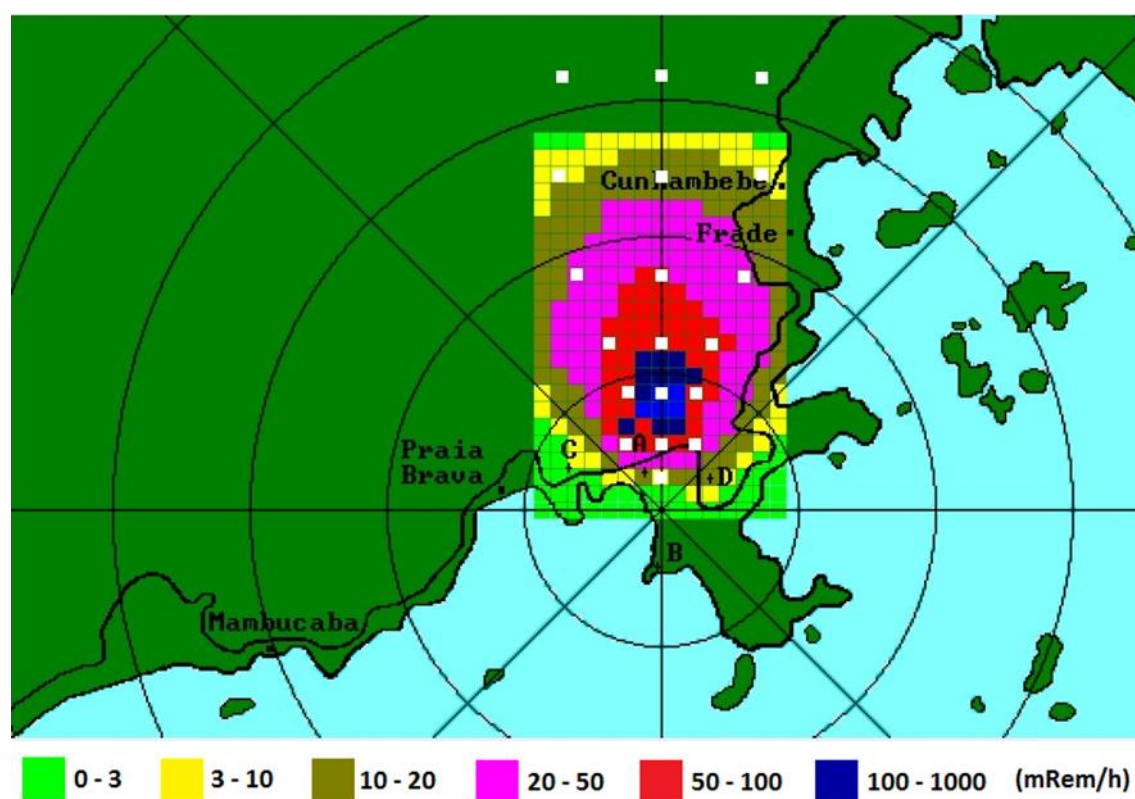


Figura 9 - Posições das medidas de campo plotadas em quadrados brancos sobre o mapa de de distribuição de doses estimadas pelo ADS 15 minutos após o início do acidente.

O tomador de decisão escolhe os pontos observando a predição original (Figura 7 ou Figura 9). No entanto, os valores das medições de campo são obtidos pela simulação da distribuição de dose real (Figura 8). A Tabela 1 mostra os valores de dose previstos e atuais (medidos) para o cenário proposto.

Tabela 1 - Taxas de doses previstas versus atuais nos pontos escolhidos pelo tomador de decisões.

Pontos#	Posição (x, y)	Taxa de dose prevista (mRem/h)	Taxa de dose medida (mRem/h)	Erro Prevista-Medida
1	16 - 39	8,210E+06	3,080E+06	2,632E+13
2	18 - 37	1,250E+09	4,840E+07	1,444E+18
3	18 - 39	1,930E+09	3,890E+08	2,375E+18
4	18 - 41	2,810E+09	2,110E+09	4,900E+17
5	21 - 37	4,400E+09	1,910E+08	1,772E+19
6	21 - 39	1,290E+10	1,390E+09	1,325E+20
7	21 - 41	2,590E+09	1,030E+09	2,434E+18
8	24 - 36	1,840E+09	9,950E+07	3,029E+18
9	24 - 39	3,460E+09	5,390E+08	8,532E+18
10	24 - 42	1,820E+09	8,700E+08	9,025E+17
11	28 - 34	1,810E+08	7,740E+05	3,248E+16
12	28 - 39	1,140E+09	4,030E+08	5,432E+17
13	28 - 44	1,760E+08	3,930E+08	4,709E+16
14	34 - 33	5,410E+06	0,000E+00	2,927E+13
15	34 - 39	4,130E+07	1,390E+08	9,545E+15
16	34 - 45	5,700E+06	1,550E+08	2,229E+16
17	40 - 33	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
18	40 - 39	0,000E+00	2,180E+07	4,752E+14
19	40 - 45	0,000E+00	2,920E+07	8,526E+14

Note que os valores de dose previstos e medidos são muito diferentes uns dos outros. A Figura 10 enfatiza essa discrepância.

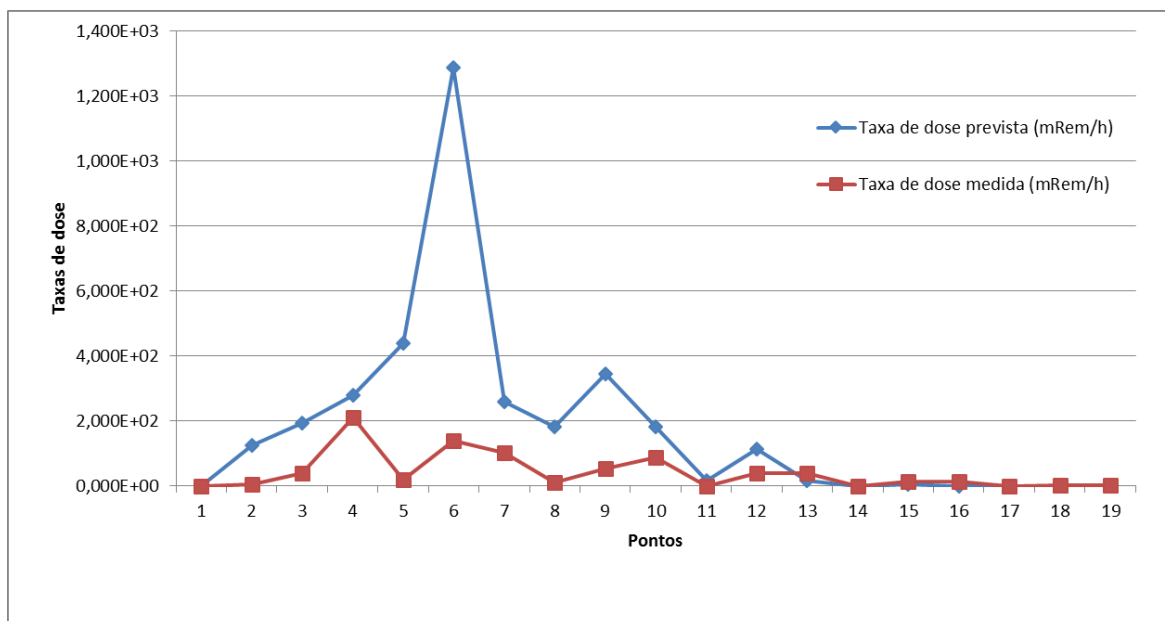


Figura 10 – Valores medidos e previstos em cada posição de medição de campo

4.2.2. Otimização do PSO

A Figura 11 apresenta um diagrama de blocos simplificado do processo de otimização do PSO. Ele recebe como entradas, o mapa de distribuição de doses original (mapa original) e as medições de campo (valores medidos). Em seguida, procura-se os melhores parâmetros de transformação (I , S_x , S_y , θ , T_x e T_y) o que leva ao erro quadrático mínimo entre os valores medidos e o respectivo valor no mapa transformado. O melhor conjunto de parâmetros é a saída PSO.

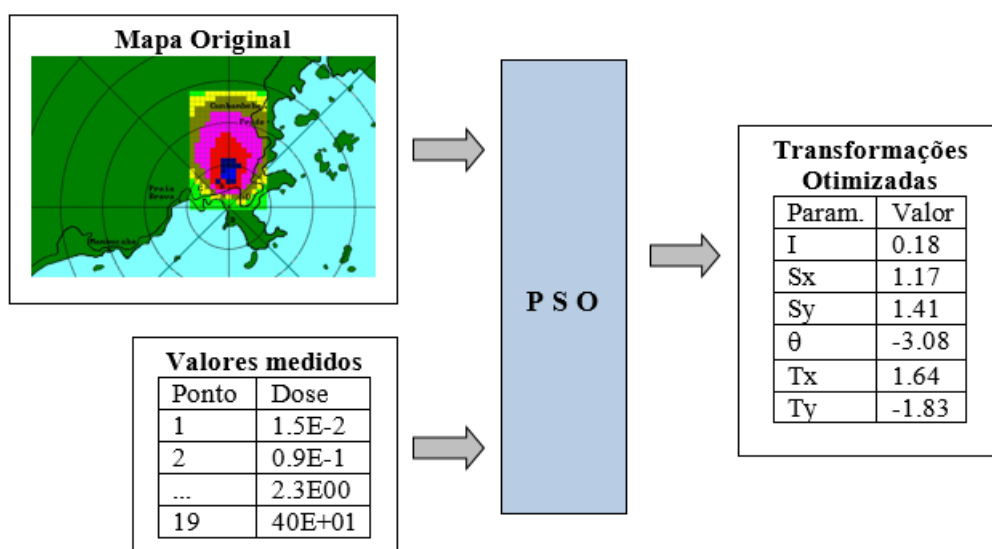


Figura 11 – Diagrama de blocos simplificado do processo de otimização.

Alguns experimentos computacionais com diferentes parâmetros para o PSO, como população, tamanho e sementes variadas, foram testados. A tabela abaixo resume os resultados obtidos.

Tabela 2 - Resumo de experimentos computacionais

Experimento #	Tamanho da população	Sementes randomizadas	Melhor Fitness	Geração da melhor	Tempo para 400 gerações (min)	Tempo para alcançar a melhor fitness (min)
1	50	1	303.753	190	15:32	7:20
2	50	9172	237.114	205	15:38	8:00
3	50	2874569	362.925	330	15:25	12:45
4	50	16102016	376.439	120	15:14	4:30
5	50	888888888	501.585	205	15:54	8:09
6	100	1	208.034	180	29:15	13:10
7	100	9172	354.664	160	29:24	11:48
8	100	2874569	215.470	130	28:14	9:10
9	100	16102016	239.419	400	28:14	28:14
10	100	888888888	208.214	140	29:22	10:15

A evolução para as 400 gerações da melhor e da média da fitness para os experimentos #6 (melhor resultado) e #9 (maior duração) são apresentados nas figuras 7, 8, 9 e 10, nos gráficos de convergência.

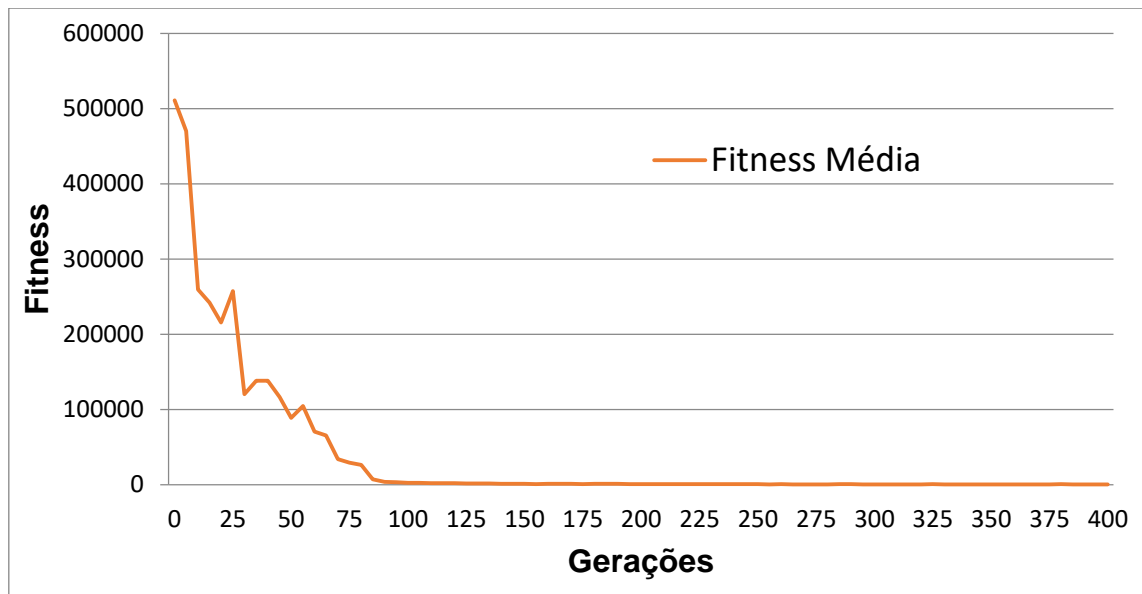


Figura 12 - Experimento #6: fitness média

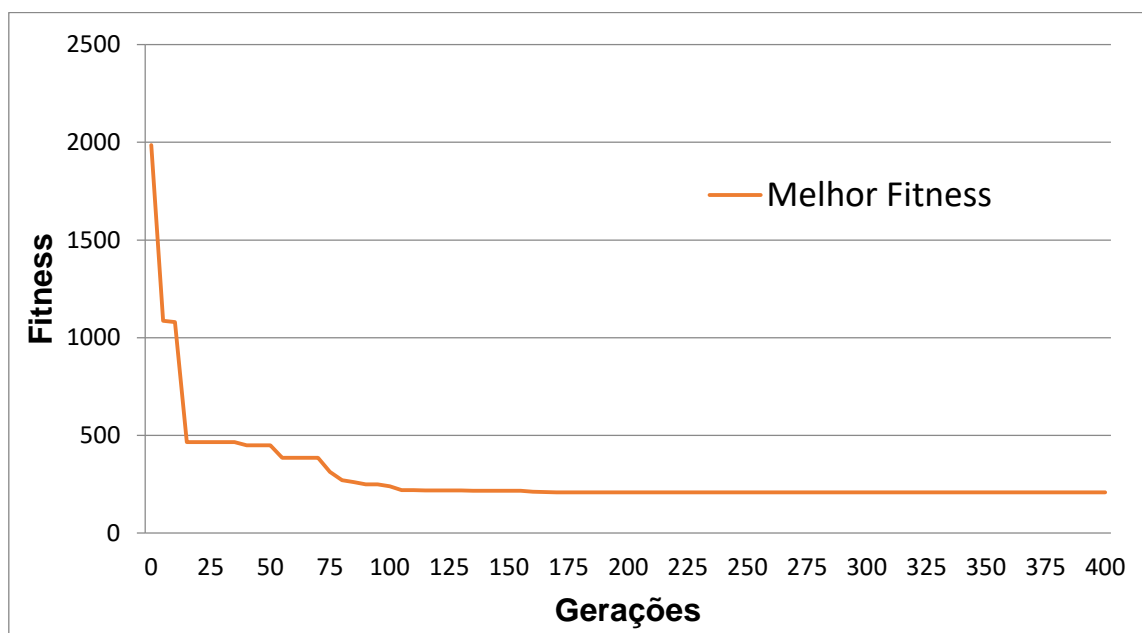


Figura 13 - Experimento #6: Melhor Fitness

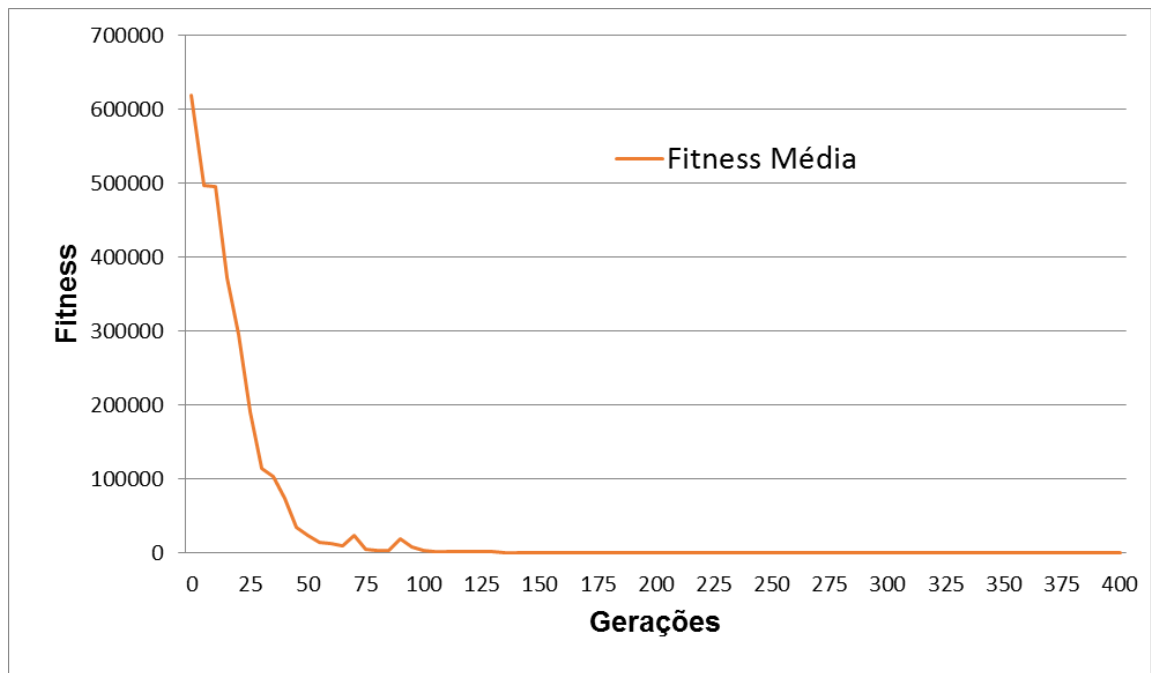


Figura 14 - Experimento #9: fitness média

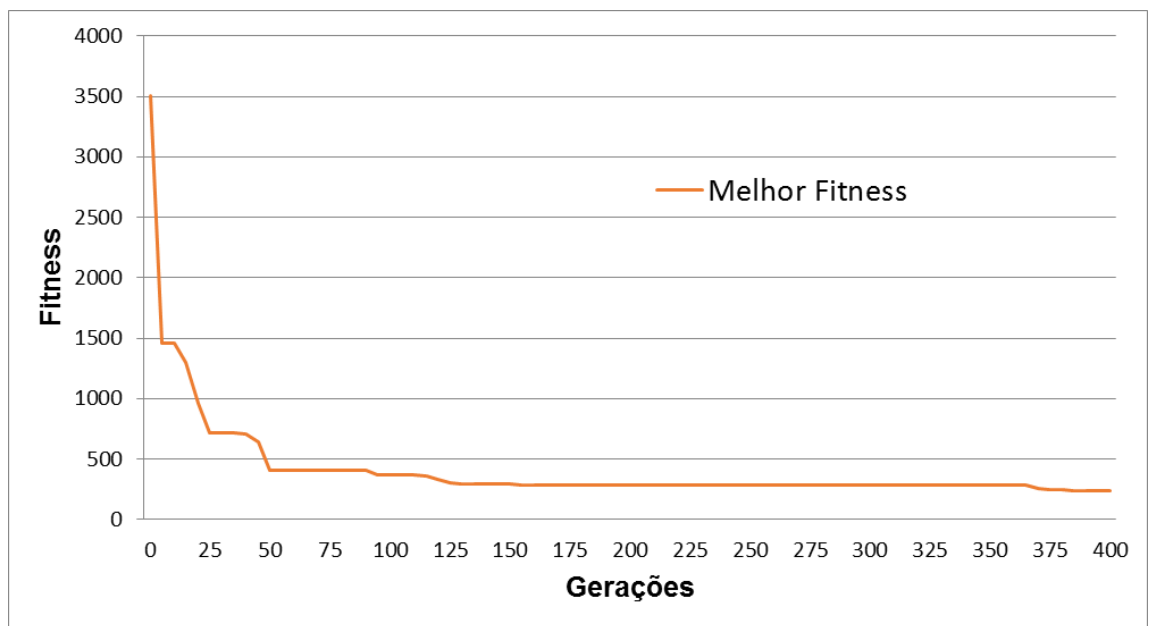


Figura 15 - Experimento #9: Melhor Fitness

Observe que valores para a fitness de mesma grandeza foram encontrados em todos os experimentos. O tempo médios para alcançar a melhor fitness, no entanto,

apresenta algumas variações, com taxas de 4:30 até 28:14 minutos. Considerando que o ADS atualiza as predições de doses a cada 15 minutos, somente o experimento #9 não seria finalizado a tempo. No entanto, analisando a convergência para a fitness deste experimento, valores muitos bons para a fitness (< 300) foram alcançados antes da geração 200 (menos de 14 minutos). Resumindo, todos os experimentos apresentaram resultados aceitáveis se as atualizações do ADS precisarem ser feitas a cada 15 minutos.

Após a aplicação do PSO no experimento com a melhor fitness (experimento #6) foram encontrados os seguintes parâmetros de transformação apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros de transformação encontrados pelo PSO

Parâmetro	Valor
Intensity weight	0.17558
Scale X	1.16578
Scale Y	1.41357
Rotation	-3.07911
Translation X	1.6396
Translation Y	-1.8252

Aplicando as transformações otimizadas encontradas pelo PSO, um mapa corrigido é gerado, como ilustrado na Figura 16.

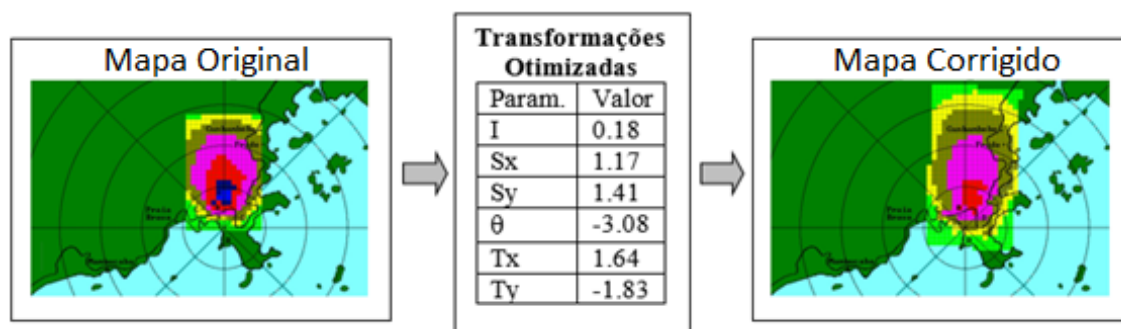


Figura 16 – Geração do mapa corrigido aplicando transformações otimizadas.

A Tabela 4 apresenta os valores corrigidos obtidos aplicando as transformações ótimas encontradas pelo PSO, lado a lado com os valores medidos reais e a predição original (incorreta).

Tabela 4 – Valores previstos, medidos e corrigidos.

Pontos #	Posição (x, y)	Taxa de dose prevista (mRem/h)	Taxa de dose medida (mRem/h)	Taxas de dose corrigidas (mRem/h)	Erro Medido- Estimado	Erro Medido- Corrigido
1	16 - 39	8,210E-01	3,080E-01	1,770E+01	2,632E-01	3,025E+02
2	18 - 37	1,250E+02	4,840E+00	2,050E+01	1,444E+04	2,452E+02
3	18 - 39	1,930E+02	3,890E+01	7,180E+01	2,375E+04	1,082E+03
4	18 - 41	2,810E+02	2,110E+02	2,110E+02	4,900E+03	0,000E+00
5	21 - 37	4,400E+02	1,910E+01	2,940E+01	1,772E+05	1,061E+02
6	21 - 39	1,290E+03	1,390E+02	1,080E+02	1,325E+06	9,610E+02
7	21 - 41	2,590E+02	1,030E+02	1,170E+02	2,434E+04	1,960E+02
8	24 - 36	1,840E+02	9,950E+00	1,270E+01	3,029E+04	7,563E+00
9	24 - 39	3,460E+02	5,390E+01	5,290E+01	8,532E+04	1,000E+00
10	24 - 42	1,820E+02	8,700E+01	6,990E+01	9,025E+03	2,924E+02
11	28 - 34	1,810E+01	7,740E-02	1,830E+00	3,248E+02	3,072E+00
12	28 - 39	1,140E+02	4,030E+01	3,310E+01	5,432E+03	5,184E+01
13	28 - 44	1,760E+01	3,930E+01	1,720E+01	4,709E+02	4,884E+02
14	34 - 33	5,410E-01	0,000E+00	3,880E-01	2,927E-01	1,505E-01
15	34 - 39	4,130E+00	1,390E+01	4,020E+00	9,545E+01	9,761E+01
16	34 - 45	5,700E-01	1,550E+01	2,620E+00	2,229E+02	1,659E+02
17	40 - 33	0,000E+00	0,000E+00	3,130E-02	0,000E+00	9,797E-04
18	40 - 39	0,000E+00	2,180E+00	2,150E-01	4,752E+00	3,861E+00
19	40 - 45	0,000E+00	2,920E+00	2,050E-01	8,526E+00	7,371E+00

A Figura 17 mostra graficamente os valores da Tabela 4, enfatizando as melhorias obtidas usando as transformações encontradas pelo PSO.

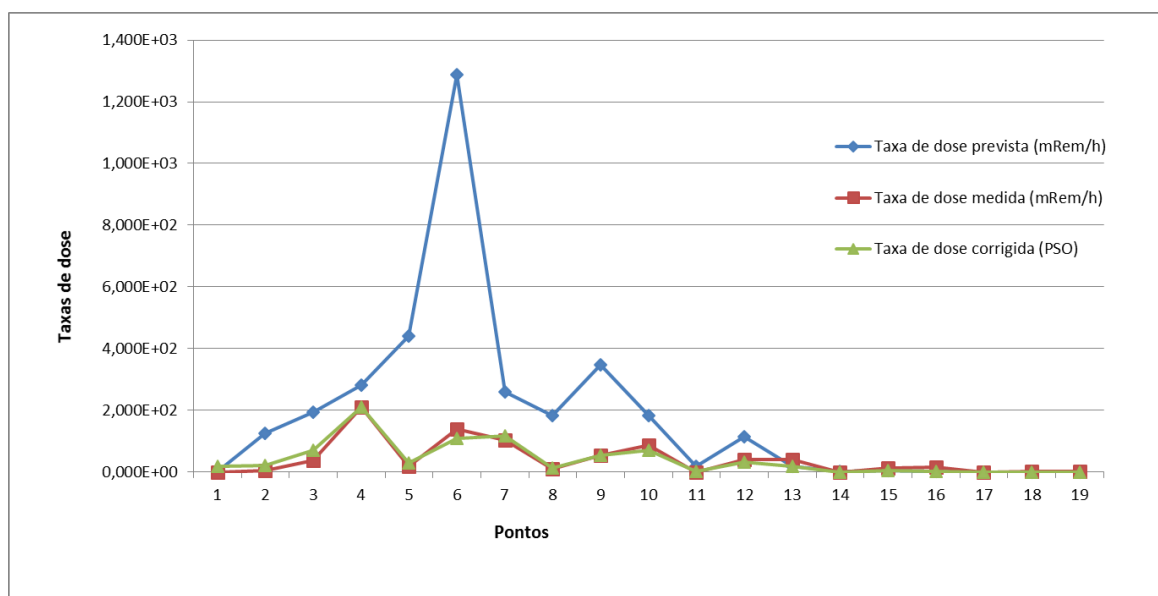


Figura 17 – Valores medidos, previstos e corrigidos em cada posição de medição de campo.

Na Figura 17, pode ser observado o quão bom foram os ajustes dos valores corrigidos para as medições de campo. A Figura 18 mostra o resultado da aplicação da correção ao mapa originalmente previsto.

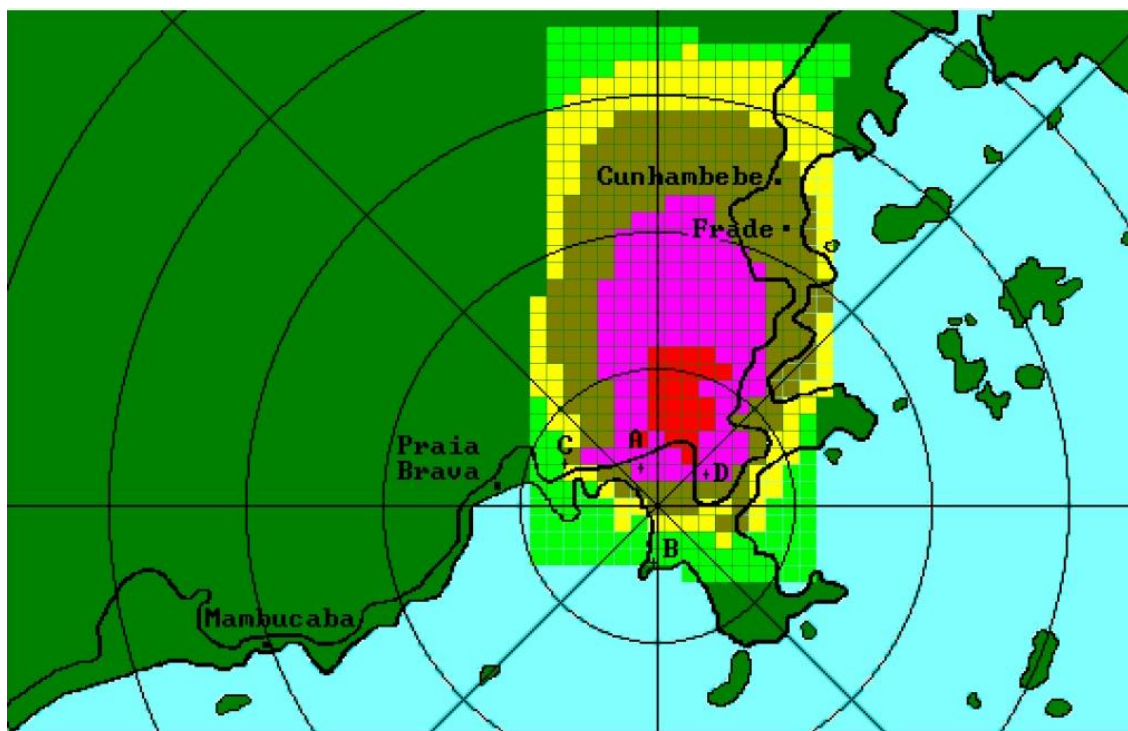


Figura 18 – Distribuição de doses corrigidas 15 minutos após o início do acidente.

De forma a comparar a similaridade entre os mapas de distribuição de dose, foi adotado como métrica o erro médio quadrático de todos os pontos do mapa.

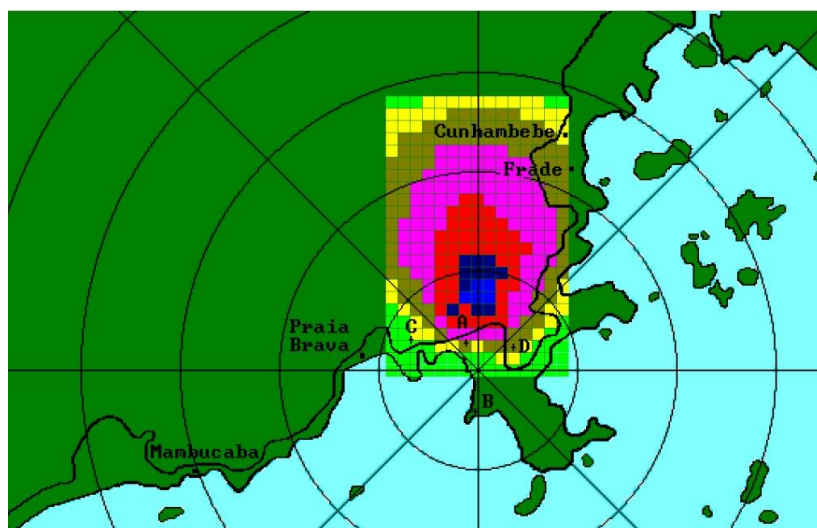
A Tabela 5 evidencia a discrepância dos mapas estimados e corrigidos para o mapa real.

Tabela 5 - Discrepância dos mapas estimados e corrigidos para o mapa real

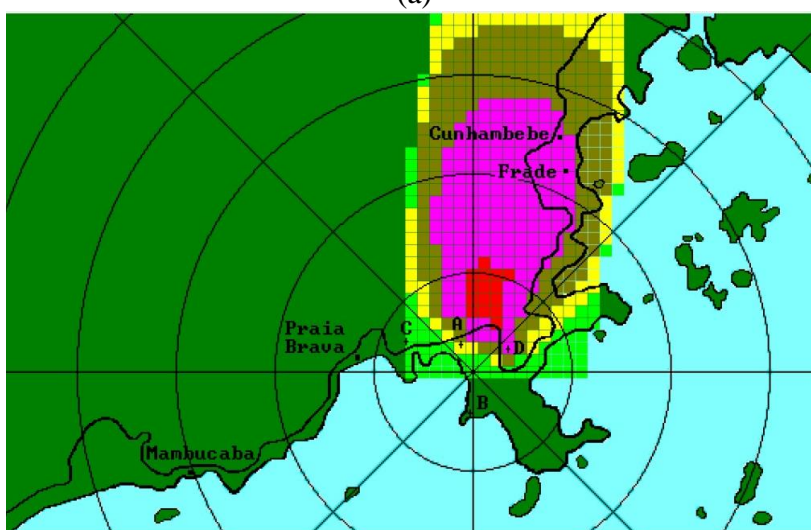
	Erro
Medido - Estimado	5,51E+03
Medido - Corrigido	7,14E+01

De acordo com a Tabela 5, observa-se que o mapa corrigido está muito mais próximo da situação medida (real) do que o originalmente previsto. Embora o ajuste entre valores medidos e preditos nos pontos medidos seja bom, várias diferenças

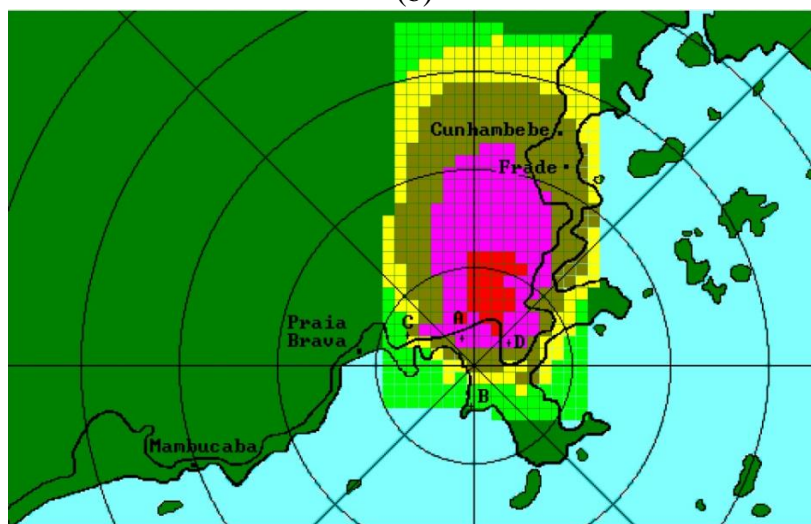
podem ser observadas nos mapas da Figura 8 (simulação da realidade) e Figura 18 (estimativa melhorada). Esta diferença surge devido à escolha das posições das medições. Trabalhos adicionais tratarão especificamente desta investigação. A Figura 19 permite a comparação visual entre os mapas: original, atual e corrigido.



(a)



(b)



(c)

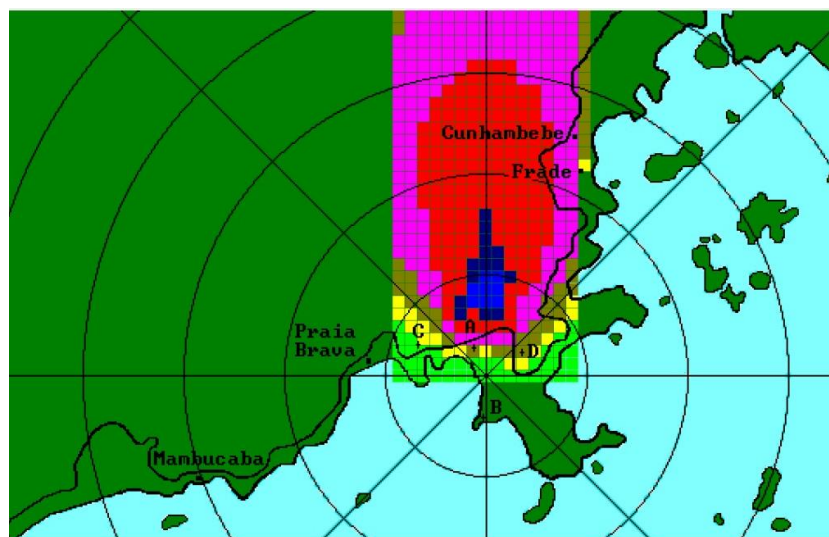
Figura 19 – Comparação visual entre os mapas (a) original, (b) atual e (c) corrigido
(15 minutos após o acidente)

4.2.3. Usando matriz de correção em projeções futuras

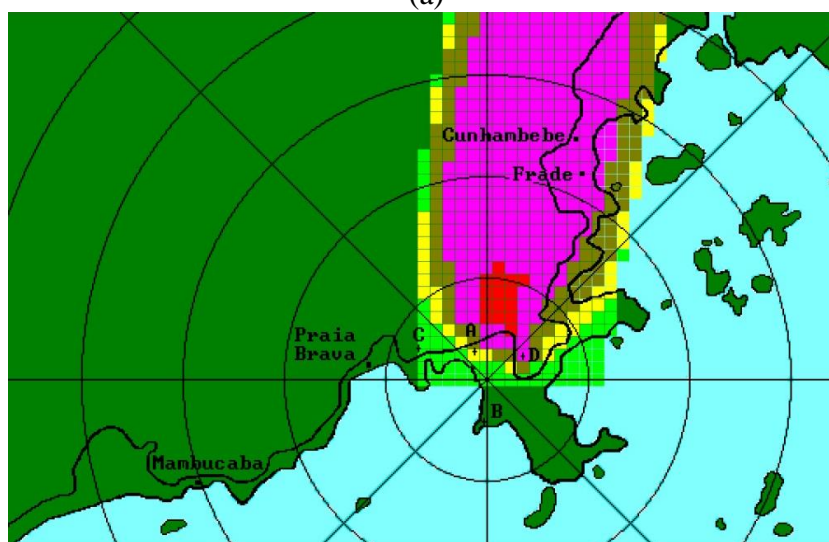
Após a obtenção da matriz de correção, otimizada para ajustar o mapa original às medidas de campo, foi investigada a aplicação da mesma matriz de correção (encontrada 15 minutos após o início do acidente) para tempos futuros.

Aqui, foi investigada a aplicação das transformações ótimas encontradas nos mapas de dose gerados 30 minutos (45 minutos após o início do acidente) e 1 hora (75 minutos após o início do acidente) após à otimização.

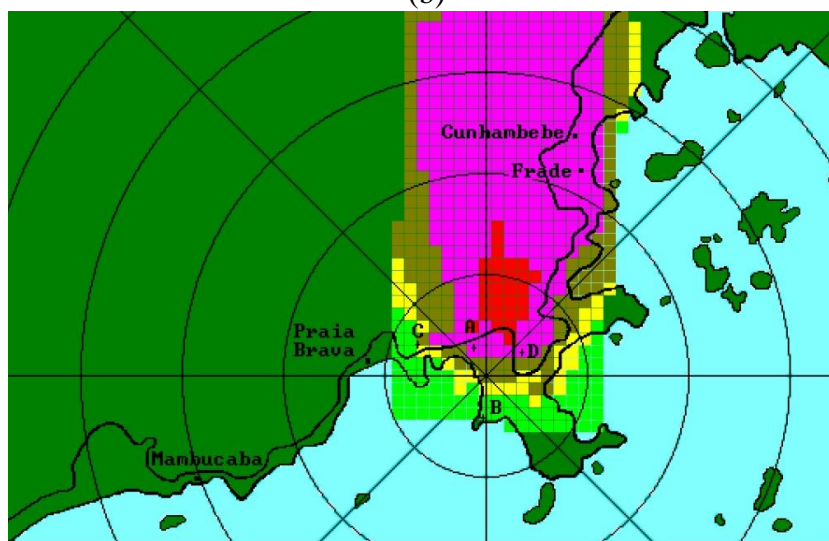
A Figura 20 permite uma comparação e avaliação visual do mapa melhorado (corrigido) para o tempo de 45 minutos após o início do acidente.



(a)



(b)



(c)

Figura 20 – Comparação visual entre os mapas (a) original, (b) real e (c) corrigido (45 minutos após o início do acidente)

Note que o mapa corrigido (Figura 20 c) é ainda bem melhor ajustados que o mapa atual (simulando a realidade), demonstrando que a matriz de transformação pode ser usada para projeções futuras. O gráfico da Figura 21 enfatiza esta afirmação comparando os valores de dose nas posições de medições de campo.

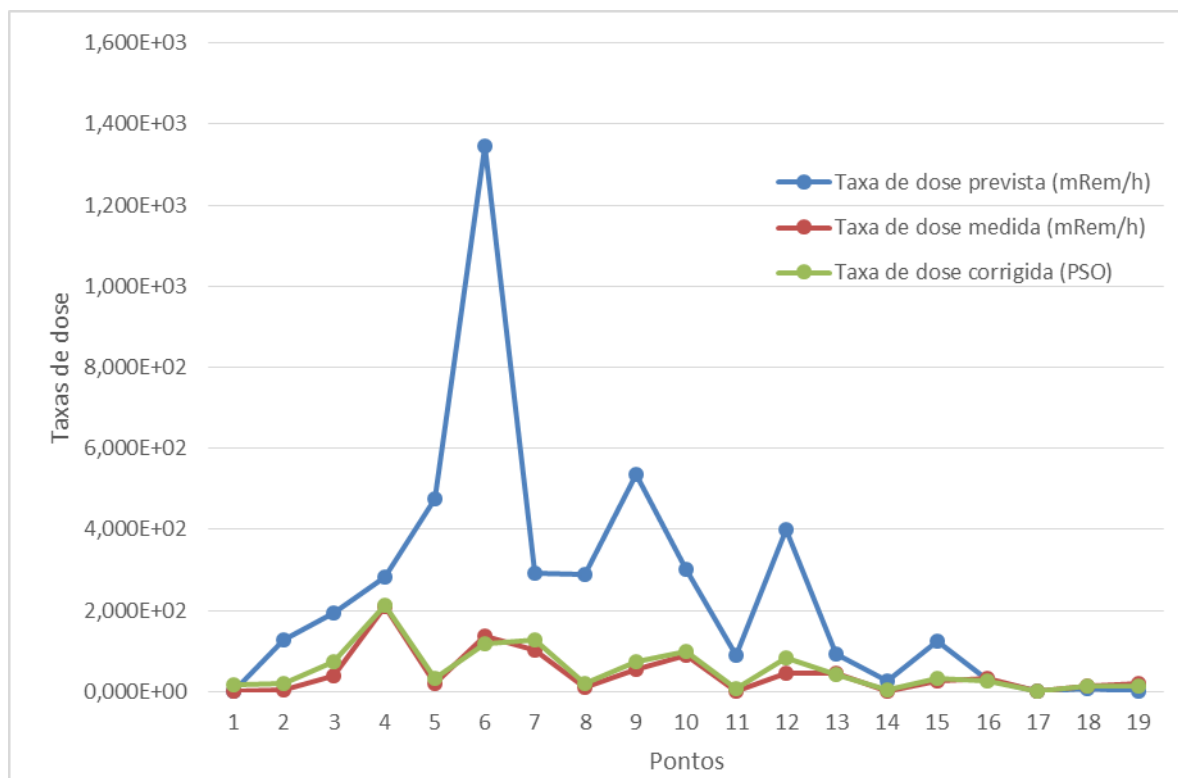


Figura 21 – Valores atuais e corrigidos para cada posição de campo medida.

Observe que na Figura 21, os valores de dose nos pontos do mapa corrigido ainda se aproximam muito do cenário real.

A Figura 22 apresenta o mapa original gerado pelo ADS 1 hora e 15 minutos após o acidente.

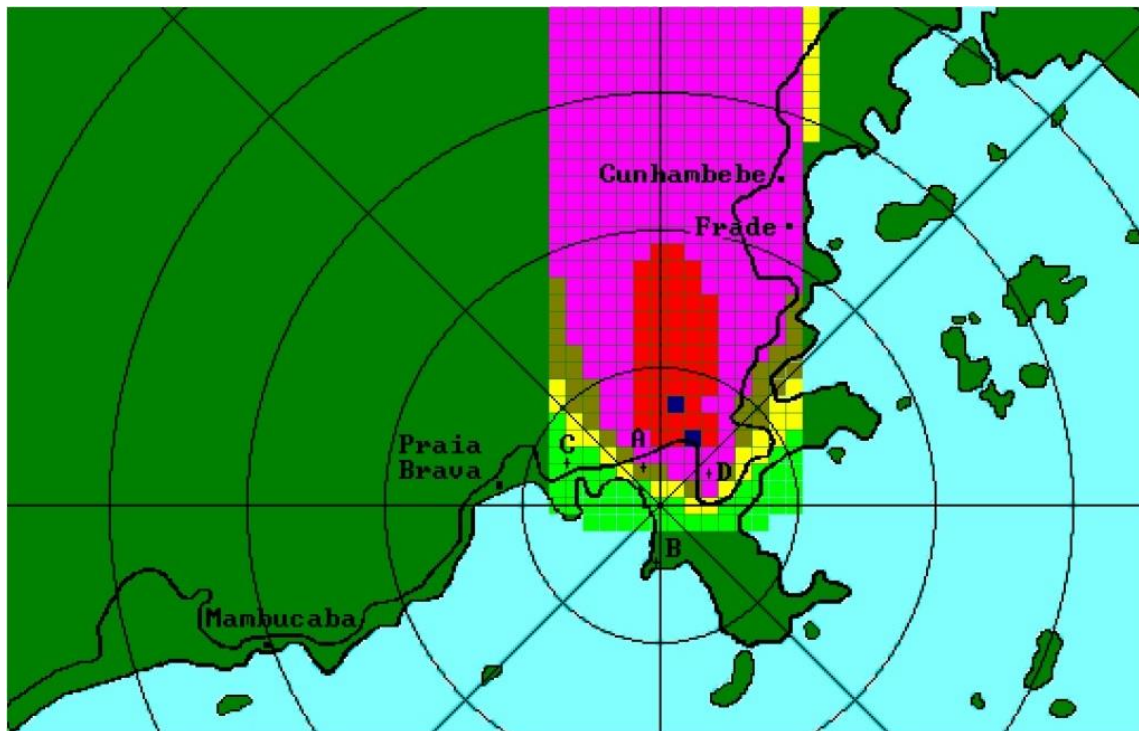


Figura 22 – Distribuição de doses orininal estimada pelo ADS 1h e 15 min após o início do acidente.

Comparando com o mapa da Figura 22 ao mapa da Figura 20 percebe-se nitidamente uma diminuição forte na intensidade das doses próximo a usina.

A Figura 23 apresenta a distribuição de doses simuladas pelo ADS para 1h e 15 minutos após o início do acidente, onde percebe-se pouca variação em relação ao resultado da Figura 20 (b). Já a correção das doses apresentada na Figura 24, exibe uma clara distorção na forma e intensidade das doses, demonstrando que para o intervalo de tempo de 1 hora após a otimização, os resultados já não funcionam bem e o o processo de otimização precisa ser reexecutado.

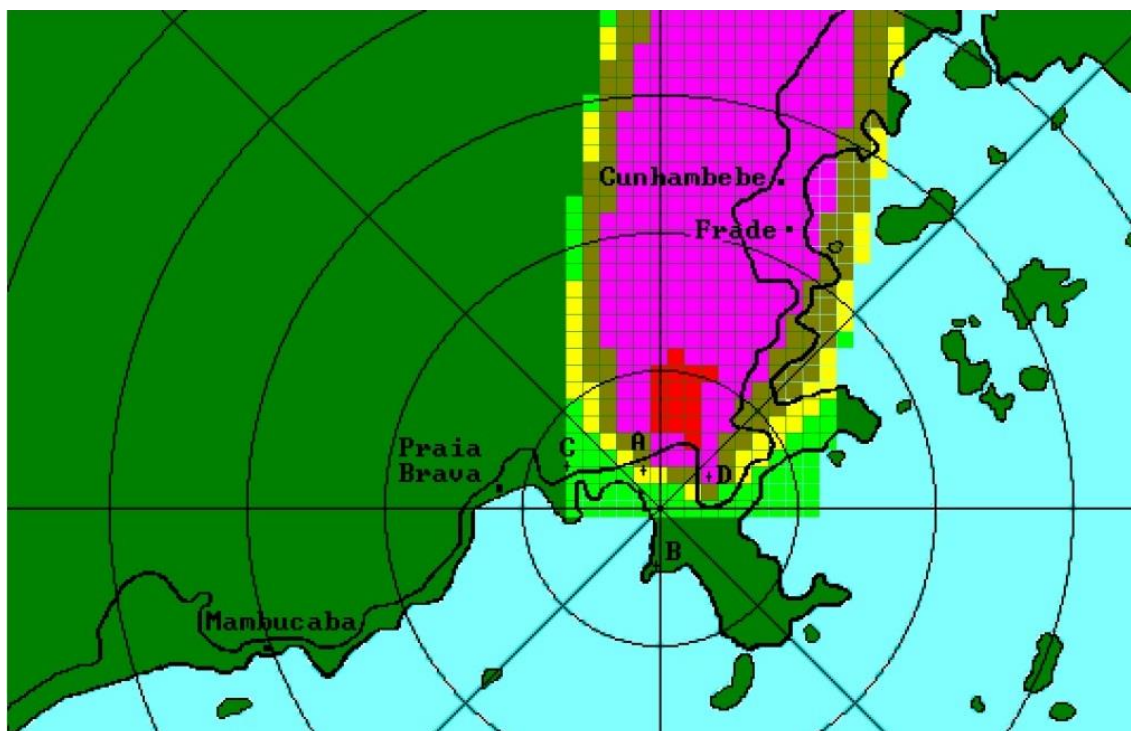


Figura 23 – Distribuição de doses atual 1h e 15 min após o início do acidente (ADS)

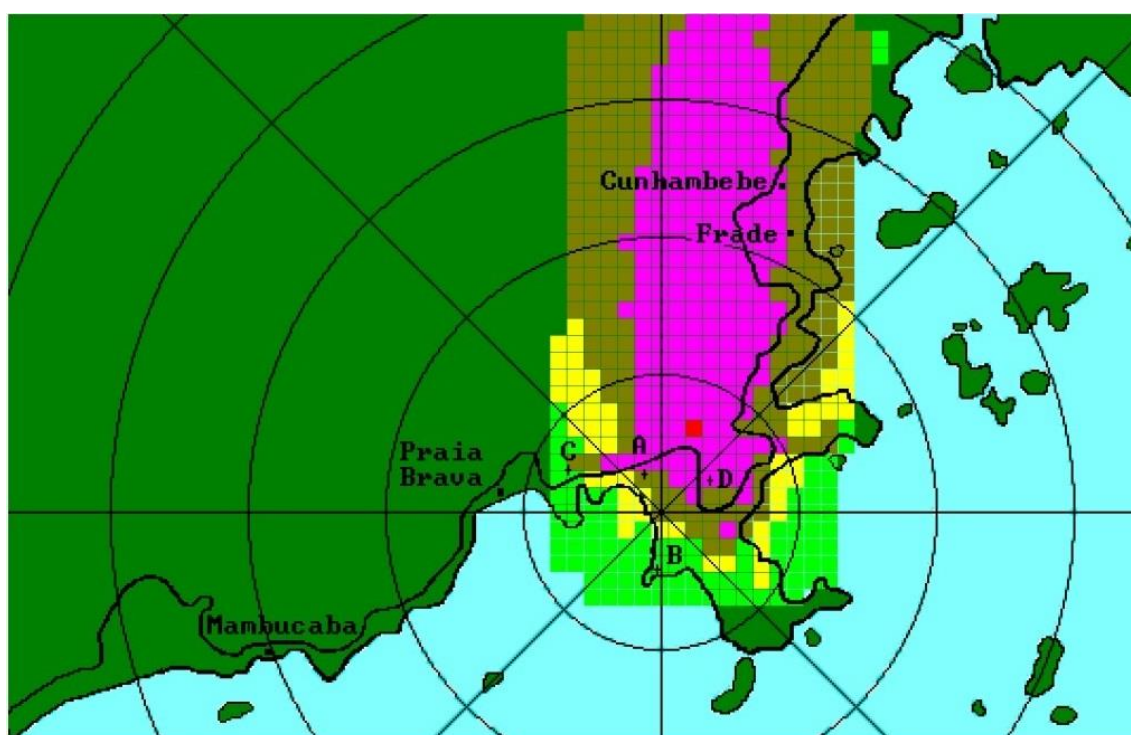


Figura 24 – Distribuição de doses corrigidas 1h e 15 min após o início do acidente

O gráfico da Figura 25 enfatiza a piora dos resultados da otimização quando aplicados à um mapa de 1 hora à frente, comparando os valores de dose nas posições de medições de campo para o mapa original, o corrigido e o cenário real (de onde são extraídas as medidas de campo).

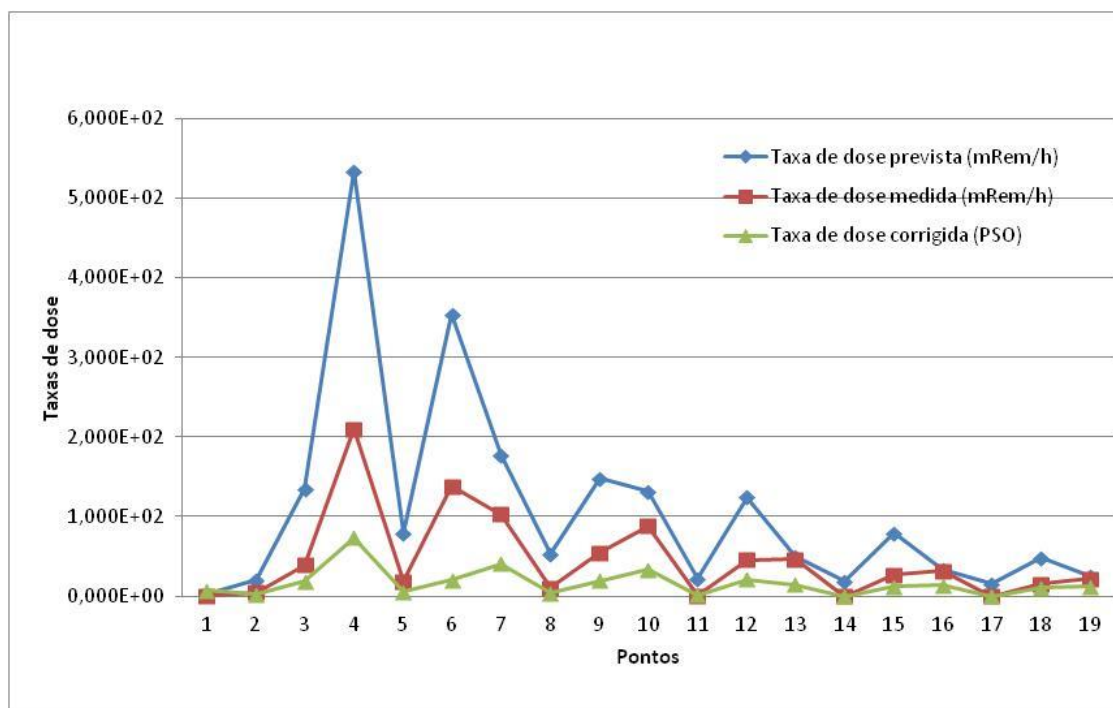


Figura 25 – Valores atuais e corrigidos para cada posição de campo medida 1 h e 15 min após o acidente.

O gráfico da Figura 25 já apresenta uma tendência a subestimar as doses em uma projeção futura de 1 hora, levando a crer que o processo de otimização precisa ser executado com uma maior frequência.

A Tabela 6 apresenta novamente os valores corrigidos obtidos aplicando as transformações ótimas encontradas pelo PSO no segundo ciclo (15 min) para a matriz de dados após 1h e 15 minutos, lado a lado com os valores medidos reais e a predição original (incorreta). Nesta apresentamos também o erro entre os valores corrigidos e estimados

Tabela 6 - Valores corrigidos, medidos e previstos para 1 h e 15 minutos após o acidente

Ponto #	Posição na matriz (x,y)	Taxa de dose prevista (mRem/h)	Taxa de dose medida (mRem/h)	Taxa de dose corrigida (PSO)	Erro Medido-Corrigido
1	16 - 39	1,889E+00	3,078E-01	6,834E+00	-6,526E+00
2	18 - 37	2,042E+01	4,845E+00	2,388E+00	2,456E+00
3	18 - 39	1,351E+02	3,890E+01	1,848E+01	2,042E+01
4	18 - 41	5,345E+02	2,105E+02	7,353E+01	1,370E+02
5	21 - 37	7,959E+01	1,915E+01	5,070E+00	1,408E+01
6	21 - 39	3,539E+02	1,386E+02	2,069E+01	1,179E+02
7	21 - 41	1,779E+02	1,028E+02	4,061E+01	6,220E+01
8	24 - 36	5,255E+01	1,019E+01	4,402E+00	5,788E+00
9	24 - 39	1,483E+02	5,472E+01	1,964E+01	3,508E+01
10	24 - 42	1,316E+02	8,830E+01	3,314E+01	5,515E+01
11	28 - 34	2,138E+01	7,745E-02	1,356E+00	-1,278E+00
12	28 - 39	1,240E+02	4,548E+01	2,099E+01	2,450E+01
13	28 - 44	4,961E+01	4,592E+01	1,470E+01	3,122E+01
14	34 - 33	1,834E+01	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
15	34 - 39	7,903E+01	2,635E+01	1,225E+01	1,410E+01
16	34 - 45	3,378E+01	3,194E+01	1,402E+01	1,792E+01
17	40 - 33	1,594E+01	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
18	40 - 39	4,804E+01	1,507E+01	1,020E+01	4,878E+00
19	40 - 45	2,489E+01	2,208E+01	1,260E+01	9,480E+00

O erro em alguns pontos chega a apresentar valores 100 vezes maiores que os dos pontos medidos em relação ao que foi corrigido pelo PSO.

Porém como observado na tabela com os experimentos e destacado a possibilidade de se obter resultados pelo SCA a cada 15 minutos, foi executado um novo teste, aplicando o PSO aos valores gerados pelo SCA 1h e 15 minutos após o acidente, gerando um novo conjunto de parâmetros de correção que aplicados aos valores reais do ciclo 6 para o melhor caso (experimento #6) obtêm-se os resultados apresentados na Figura 26

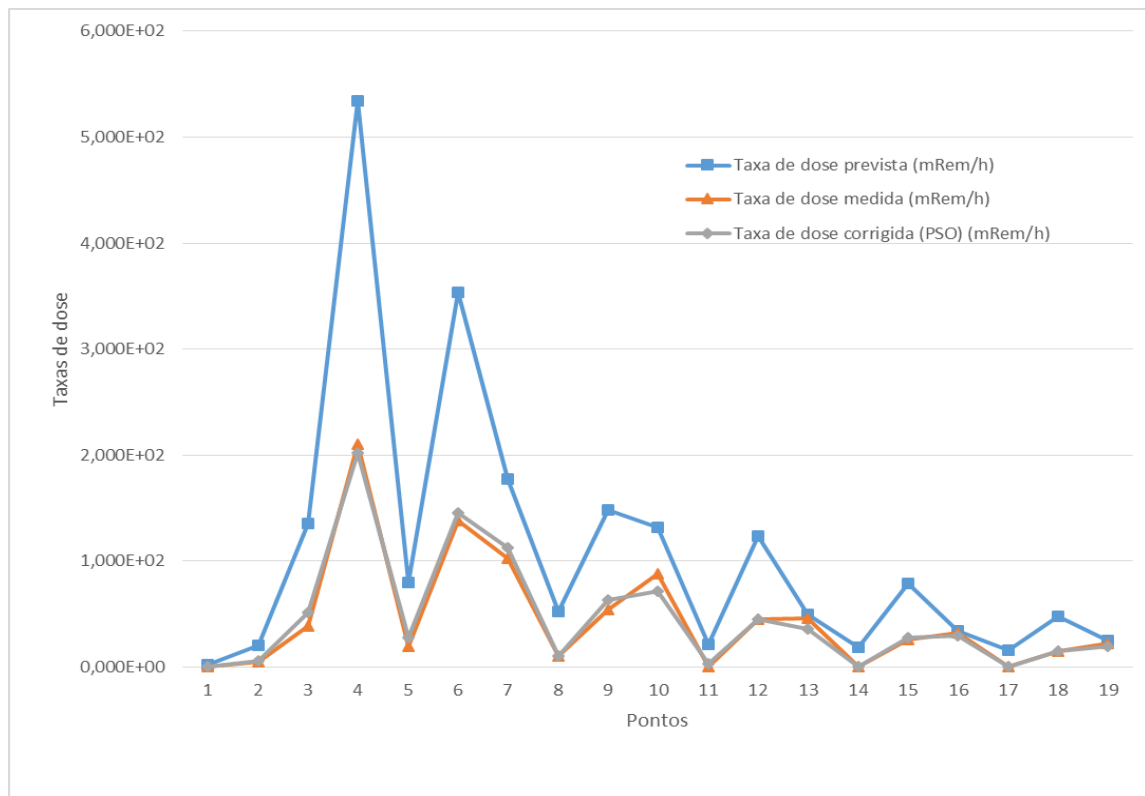


Figura 26 - Taxas de dose do ciclo 6, com transformações obtidas no mesmo ciclo (experimento #6)

O gráfico da Figura 26 novamente apresenta resultados corrigidos muito parecido com o que pode ser observado no ciclo 2 e os valores da tabela com o erro podem constatar mais uma vez a diferença na grandeza do erro.

Tabela 7 - Valores corrigidos, medidos e previstos para o ciclo 6 com transformações obtidas no mesmo ciclo (experimento #6)

Ponto #	Posição na matriz (x,y)	Taxa de dose prevista (mRem/h)	Taxa de dose medida (mRem/h)	Taxa de dose corrigida (PSO) (mRem/h)	Erro prevista - medida	Erro medida - corrigida
1	16 - 39	1,889E+00	3,078E-01	7,141E-01	2,501E+00	1,651E-01
2	18 - 37	2,042E+01	4,845E+00	6,023E+00	2,427E+02	1,387E+00
3	18 - 39	1,351E+02	3,890E+01	5,108E+01	9,262E+03	1,483E+02
4	18 - 41	5,345E+02	2,105E+02	2,020E+02	1,050E+05	7,242E+01
5	21 - 37	7,959E+01	1,915E+01	2,751E+01	3,653E+03	6,979E+01
6	21 - 39	3,539E+02	1,386E+02	1,451E+02	4,634E+04	4,173E+01
7	21 - 41	1,779E+02	1,028E+02	1,122E+02	5,637E+03	8,873E+01
8	24 - 36	5,255E+01	1,019E+01	1,041E+01	1,794E+03	4,747E-02
9	24 - 39	1,483E+02	5,472E+01	6,296E+01	8,766E+03	6,793E+01
10	24 - 42	1,316E+02	8,830E+01	7,128E+01	1,875E+03	2,894E+02
11	28 - 34	2,138E+01	7,745E-02	2,920E+00	4,538E+02	8,080E+00
12	28 - 39	1,240E+02	4,548E+01	4,518E+01	6,158E+03	9,419E-02
13	28 - 44	4,961E+01	4,592E+01	3,578E+01	1,362E+01	1,028E+02
14	34 - 33	1,834E+01	0,000E+00	0,000E+00	3,365E+02	0,000E+00
15	34 - 39	7,903E+01	2,635E+01	2,781E+01	2,775E+03	2,121E+00
16	34 - 45	3,378E+01	3,194E+01	2,944E+01	3,379E+00	6,262E+00
17	40 - 33	1,594E+01	0,000E+00	0,000E+00	2,540E+02	0,000E+00
18	40 - 39	4,804E+01	1,507E+01	1,515E+01	1,087E+03	5,677E-03
19	40 - 45	2,489E+01	2,208E+01	1,998E+01	7,899E+00	4,420E+00

Calculando a média dos erros prevista-medida e medida-corrigida temos respectivamente: 1,019E+04 e 4,756E+01 (mRem/h).

Repetindo os testes para o caso de maior duração (experimento #9), conforme descrito para o experimento #6 no ciclo 6 obtivemos os seguintes resultados:

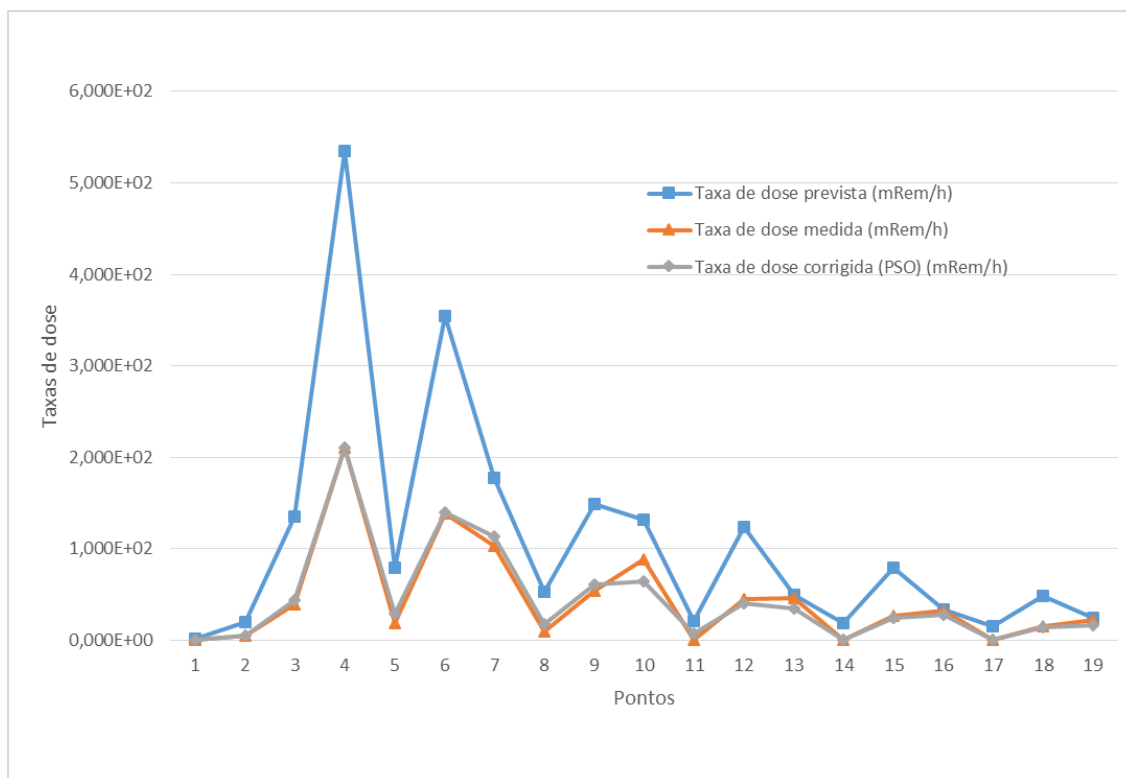


Figura 27 - Taxas de dose do ciclo 6, com transformações obtidas no mesmo ciclo (experimento #9)

Calculando a média dos erros prevista-medida e medida-corrigida temos respectivamente: $1,0190\text{E}+04$ e $6,1688\text{E}+01$ (mRem/h). Estes valores representam o quanto se é possível aproximar dos valores medidos em campo em relação ao que se é previsto pelo SCA mesmo no pior caso, aplicando sempre o PSO para obtermos as transformações a cada ciclo.

Tabela 8 - Valores corrigidos, medidos e previstos para o ciclo 6 com transformações obtidas no mesmo ciclo (experimento #9)

Ponto #	Posição na matriz (x,y)	Taxa de dose prevista (mRem/h)	Taxa de dose medida (mRem/h)	Taxa de dose corrigida (PSO) (mRem/h)	Erro prevista - medida	Erro medida - corrigida
1	16 - 39	1,889E+00	3,078E-01	1,904E-01	2,501E+00	1,378E-02
2	18 - 37	2,042E+01	4,845E+00	5,032E+00	2,427E+02	3,503E-02
3	18 - 39	1,351E+02	3,890E+01	4,444E+01	9,262E+03	3,062E+01
4	18 - 41	5,345E+02	2,105E+02	2,106E+02	1,050E+05	1,084E-04
5	21 - 37	7,959E+01	1,915E+01	2,867E+01	3,653E+03	9,051E+01
6	21 - 39	3,539E+02	1,386E+02	1,394E+02	4,634E+04	6,056E-01
7	21 - 41	1,779E+02	1,028E+02	1,131E+02	5,637E+03	1,052E+02
8	24 - 36	5,255E+01	1,019E+01	1,792E+01	1,794E+03	5,981E+01
9	24 - 39	1,483E+02	5,472E+01	6,127E+01	8,766E+03	4,301E+01
10	24 - 42	1,316E+02	8,830E+01	6,426E+01	1,875E+03	5,779E+02
11	28 - 34	2,138E+01	7,745E-02	7,390E+00	4,538E+02	5,348E+01
12	28 - 39	1,240E+02	4,548E+01	4,058E+01	6,158E+03	2,407E+01
13	28 - 44	4,961E+01	4,592E+01	3,430E+01	1,362E+01	1,351E+02
14	34 - 33	1,834E+01	0,000E+00	0,000E+00	3,365E+02	0,000E+00
15	34 - 39	7,903E+01	2,635E+01	2,494E+01	2,775E+03	1,977E+00
16	34 - 45	3,378E+01	3,194E+01	2,828E+01	3,379E+00	1,340E+01
17	40 - 33	1,594E+01	0,000E+00	0,000E+00	2,540E+02	0,000E+00
18	40 - 39	4,804E+01	1,507E+01	1,450E+01	1,087E+03	3,353E-01
19	40 - 45	2,489E+01	2,208E+01	1,608E+01	7,899E+00	3,598E+01

4.3. O SEGUNDO CENÁRIO HIPOTÉTICO CRIADO

4.3.1. APLICAÇÃO DO MÉTODO AO SEGUNDO CENÁRIO

Outros experimentos foram executados alterando a intensidade das taxas, a direção e velocidade do vento. Os resultados obtidos não apresentam discrepâncias em relação aos testes apresentados acima, dentre os testes o apresentado abaixo foi o que teve resultado menos expressivos em ganhos, mas ainda assim supera valores iniciais estimados pelo SCA.

Configurações: pluma estimada (visualizada pelo operador), direção (150°), pluma real (medida em campo), manteve-se a mesma direção e vento, alterou-se apenas a intensidade, aumentando-a em 10 vezes o valor dos pontos originais. Na Figura 28 são apresentados os pontos a serem medidos em campo, mantendo a

quantidade de 19 sempre na direção do vento. Os pontos estão representados sobre a pluma estimada pelo ADS 15 minutos após o início do acidente.

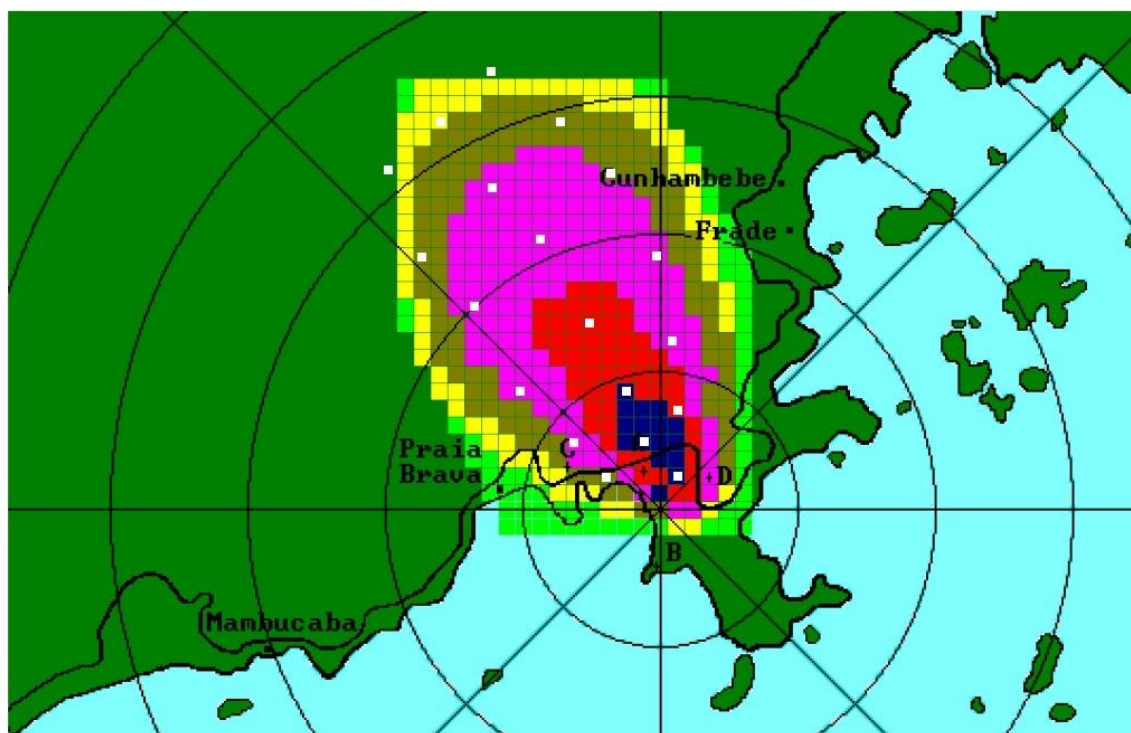


Figura 28 - Posições das medidas de campo plotadas em quadrados brancos sobre o mapa de de distribuição de doses estimadas pelo ADS 15 minutos após o início do acidente.

A Figura 29 apresenta uma situação hipotética onde a intensidade das doses é aumentada em 10 vezes os valores apresentados na Figura 28, pela escala de cores é possível perceber a diferença sofrida pela pluma.

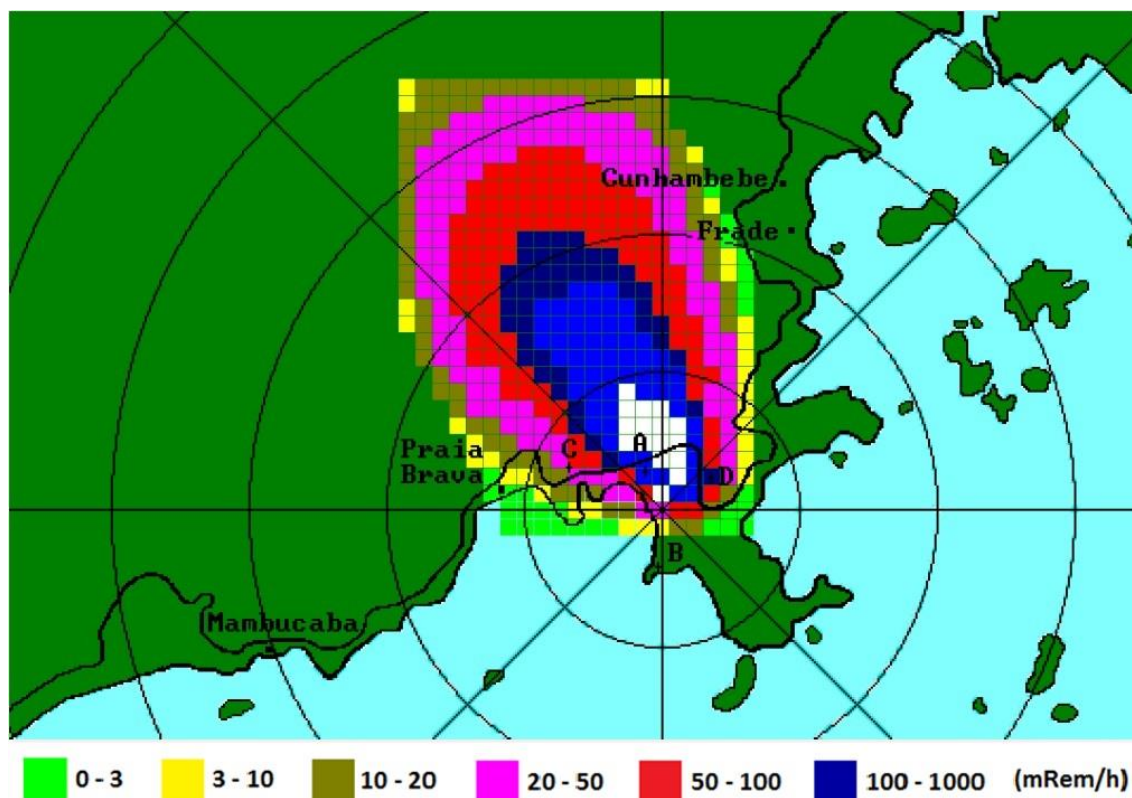


Figura 29 - Situação real simulada pelo ADS 15 minutos após o acidente

A Figura 29 apresenta a pluma transformada pelo PSO utilizando a equação (9) para o cálculo da fitness.

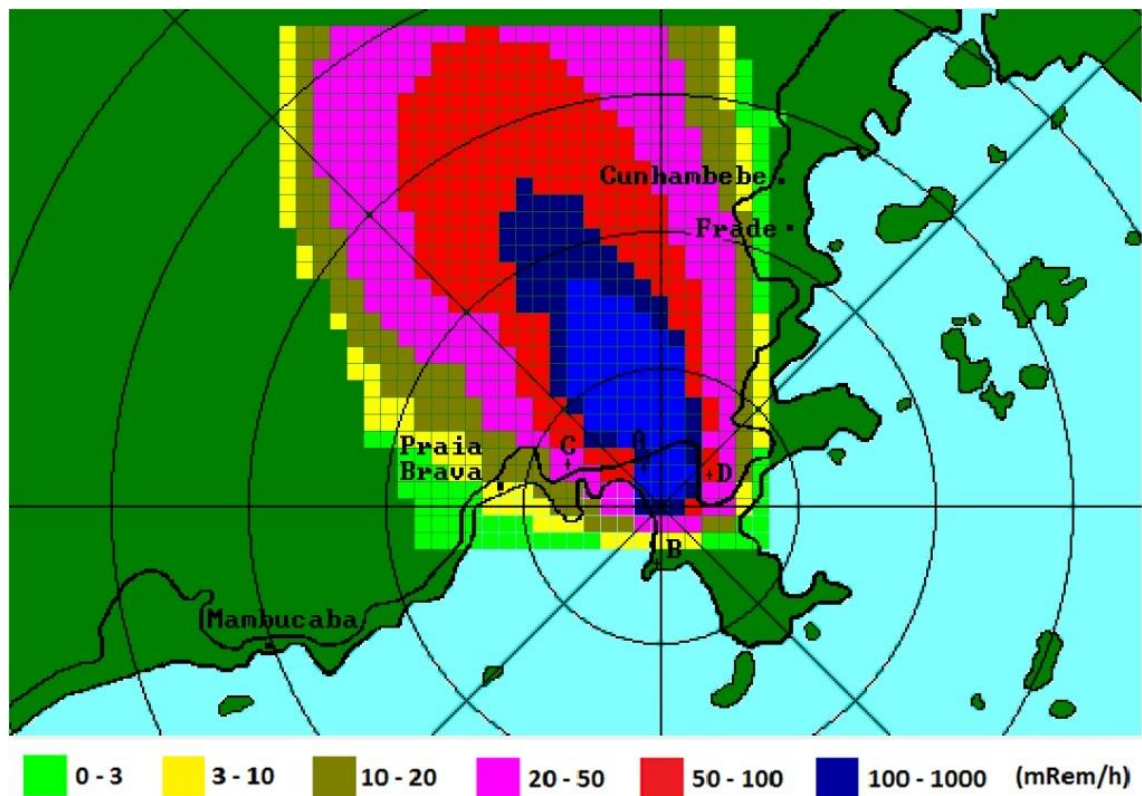


Figura 30 - Pluma corrigida pelo ADS 15 minutos após o acidente

Visualmente a pluma corrigida apresenta visual alongado, tendo esta sofrido transformações em x e y, que de fato não ocorreram na simulação criada, mas analisando o gráfico da Figura 31, com os pontos sugeridos e o valor do erro médio quadrático, métrica utilizada na avaliação dos resultados aplicados nos experimentos, baseado em todos os pontos do gráfico, ainda temos nas transformações do PSO valores melhores que os apresentados pelo ADS, demonstrando a eficácia dos testes aplicados.

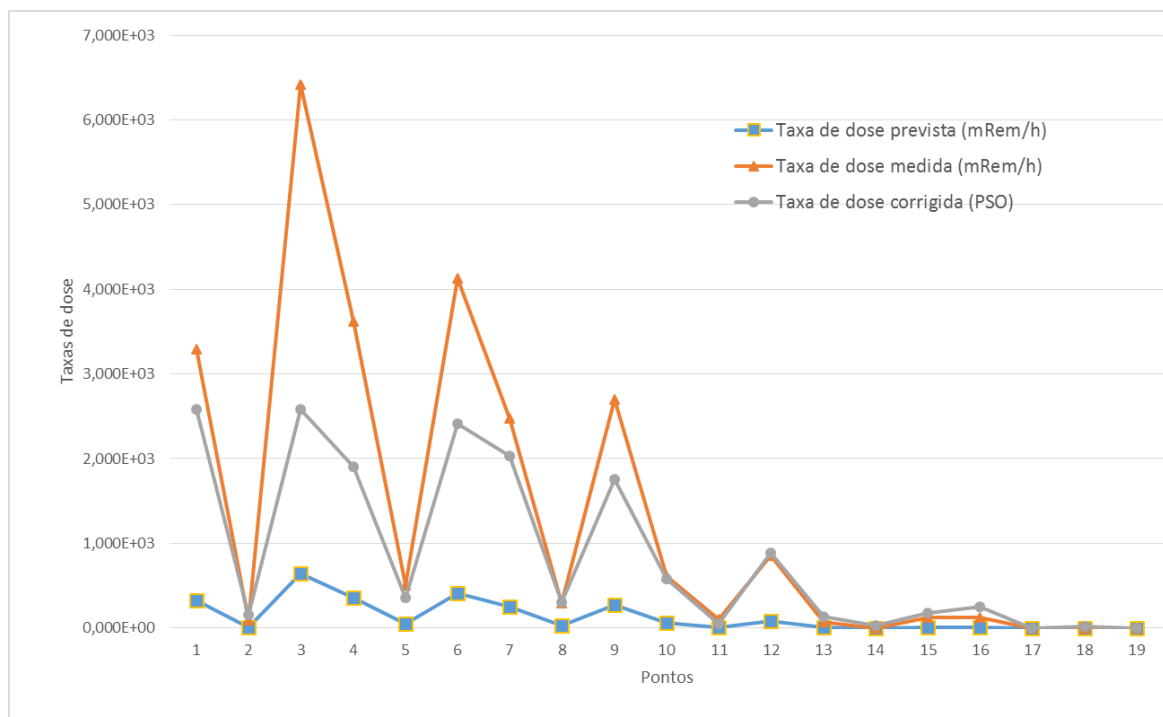


Figura 31 - Valores atuais e corrigidos para cada posição de campo medida

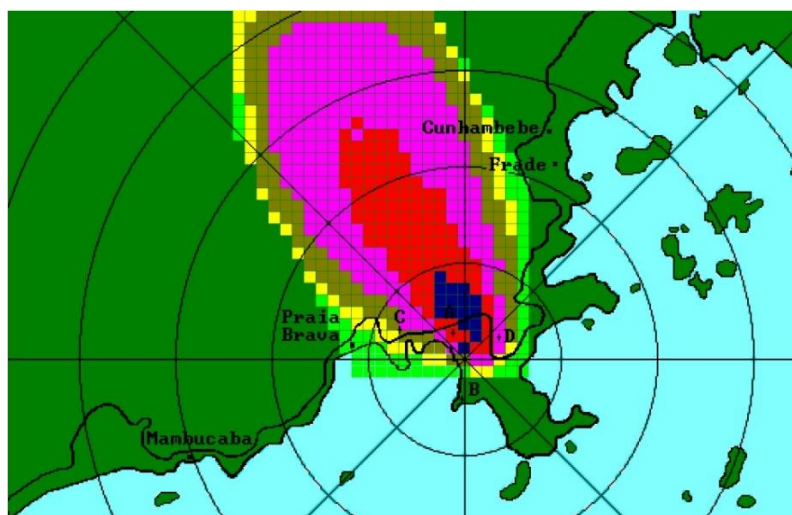
A Tabela 9 apresenta os dados referentes ao gráfico, incluindo nesta o erro para cada um dos pontos em relação aos valores estimados e corrigidos baseado nas medidas em capo (valores reais).

Tabela 9 - Valores corrigidos, medidos e previstos 15 minutos appós o acidente

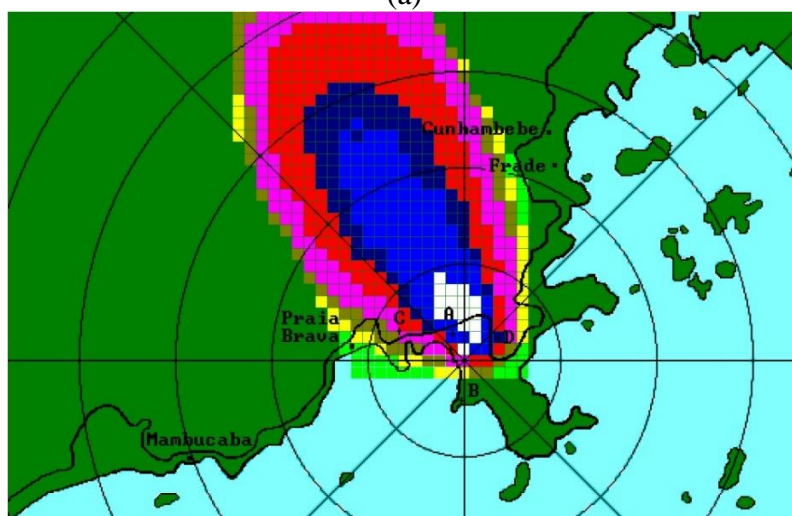
Ponto #	Posição na matriz (x,y)		Taxa de dose prevista (mRem/h)	Taxa de dose medida (mRem/h)	Taxa de dose corrigida (PSO)	Erro Medido-Previsto	Erro Medido-Corrigido
1	39	16	3,294E+02	3,294E+03	2,584E+03	8,787E+06	5,037E+05
2	36	16	9,346E+00	9,346E+01	1,512E+02	7,075E+03	3,337E+03
3	38	18	6,417E+02	6,417E+03	2,585E+03	3,336E+07	1,468E+07
4	40	20	3,618E+02	3,618E+03	1,906E+03	1,060E+07	2,930E+06
5	34	19	5,092E+01	5,092E+02	3,608E+02	2,101E+05	2,204E+04
6	36	21	4,127E+02	4,127E+03	2,409E+03	1,380E+07	2,953E+06
7	38	23	2,475E+02	2,475E+03	2,031E+03	4,962E+06	1,969E+05
8	32	21	2,930E+01	2,930E+02	3,069E+02	6,955E+04	1,929E+02
9	35	24	2,695E+02	2,695E+03	1,758E+03	5,884E+06	8,774E+05
10	38	27	6,126E+01	6,126E+02	5,808E+02	3,040E+05	1,012E+03
11	28	23	1,008E+01	1,008E+02	5,323E+01	8,231E+03	2,263E+03
12	33	28	8,557E+01	8,557E+02	8,838E+02	5,931E+05	7,907E+02
13	38	33	6,937E+00	6,937E+01	1,334E+02	3,898E+03	4,100E+03
14	23	28	0,000E+00	0,000E+00	3,024E+01	0,000E+00	9,146E+02
15	29	34	1,191E+01	1,191E+02	1,737E+02	1,148E+04	2,979E+03
16	35	34	1,190E+01	1,190E+02	2,541E+02	1,146E+04	1,827E+04
17	17	34	0,000E+00	0,000E+00	3,877E-01	0,000E+00	1,503E-01
18	39	40	0,000E+00	0,000E+00	1,732E+01	0,000E+00	3,000E+02
19	30	43	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00

Usando a mesma métrica aplicada para todo o problema, obtivemos para este experimento em todos os pontos da pluma os valores medidos - estimados e medidos - corrigidos de: $3,555E+05$ e $1,911E+05$.

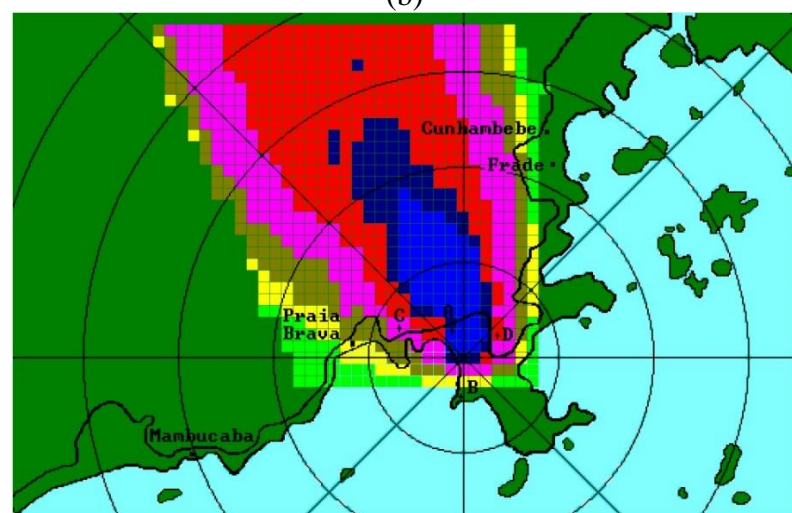
Seguindo o que foi aplicado no primeiro experimento, testamos a aplicação das transformações obtidas no primeiro ciclo 15 minutos após o início do acidente, para os valores estimados pelo ADS para o mesmo caso 45 minutos após o início do acidente. A Figura 32 permite a comparação das plumas: (a) estimada, (b) real (medida) e a (c) corrigida.



(a)



(b)



(c)

Figura 32 - Comparação visual entre os mapas (a) original, (b) real e (c) corrigido (45 minutos após o início do acidente)

O gráfico da Figura 33 apresenta a correlação entre os pontos para os 3 momentos (Original, Real e Corrigido) e a tabela exhibe o erro para cada um dos pontos avaliados pelo PSO.

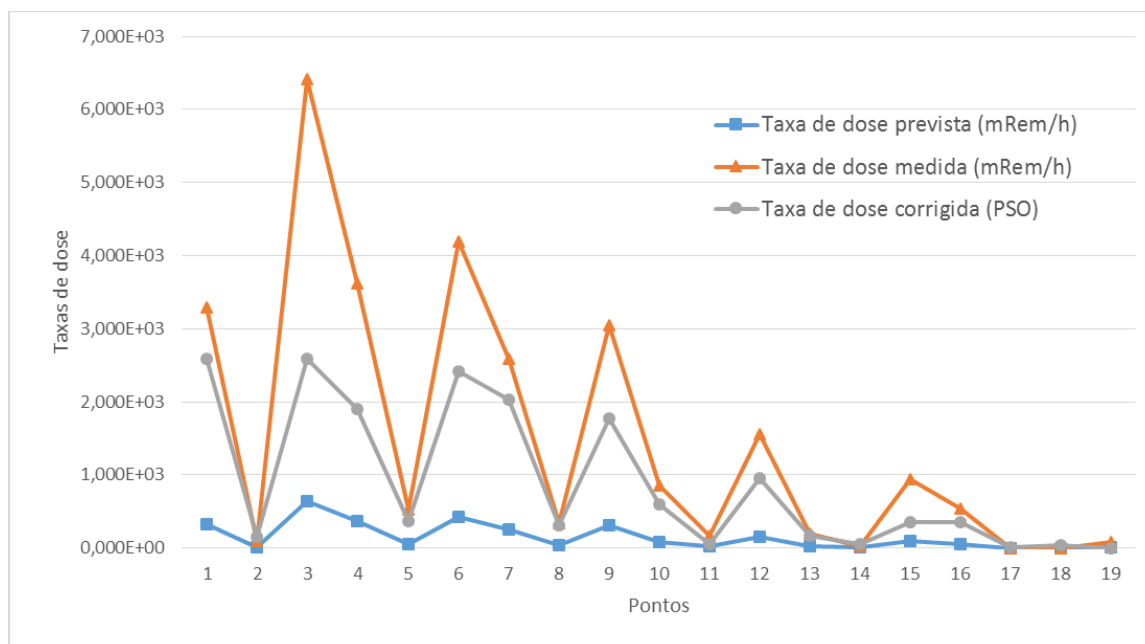


Figura 33 - Valores atuais e corrigidos para cada posição de campo medida 45 minutos após o acidente

Onde a média entre os erros: medido-previsto e medido-corrigido foram respectivamente $4,415E+06$ e $1,270E+06$ e para todos os pontos da matriz foram: $3,983E+05$ e $2,047E+05$.

Tabela 10 - Valores corrigidos, medidos e previstos 45 minutos após o acidente

Ponto #	Posição na matriz (x,y)		Taxa de dose prevista (mRem/h)	Taxa de dose medida (mRem/h)	Taxa de dose corrigida (PSO)	Erro Medido-Previsto	Erro Medido-Corrigido
1	39	16	3,294E+02	3,294E+03	2,584E+03	8,787E+06	5,037E+05
2	36	16	9,346E+00	9,346E+01	1,512E+02	7,075E+03	3,337E+03
3	38	18	6,418E+02	6,418E+03	2,585E+03	3,336E+07	1,469E+07
4	40	20	3,624E+02	3,624E+03	1,906E+03	1,064E+07	2,951E+06
5	34	19	5,176E+01	5,176E+02	3,611E+02	2,170E+05	2,450E+04
6	36	21	4,195E+02	4,195E+03	2,411E+03	1,426E+07	3,183E+06
7	38	23	2,590E+02	2,590E+03	2,035E+03	5,432E+06	3,081E+05
8	32	21	3,312E+01	3,312E+02	3,095E+02	8,884E+04	4,700E+02
9	35	24	3,050E+02	3,050E+03	1,770E+03	7,534E+06	1,638E+06
10	38	27	8,484E+01	8,484E+02	5,987E+02	5,830E+05	6,233E+04
11	28	23	1,633E+01	1,633E+02	5,773E+01	2,159E+04	1,114E+04
12	33	28	1,557E+02	1,557E+03	9,558E+02	1,963E+06	3,612E+05
13	38	33	2,017E+01	2,017E+02	1,730E+02	3,294E+04	8,234E+02
14	23	28	2,439E+00	2,439E+01	4,898E+01	4,818E+02	6,049E+02
15	29	34	9,465E+01	9,465E+02	3,589E+02	7,257E+05	3,454E+05
16	35	34	5,316E+01	5,316E+02	3,573E+02	2,289E+05	3,039E+04
17	17	34	0,000E+00	0,000E+00	1,260E+01	0,000E+00	1,588E+02
18	39	40	0,000E+00	0,000E+00	3,269E+01	0,000E+00	1,068E+03
19	30	43	8,281E+00	8,281E+01	0,000E+00	5,555E+03	6,858E+03

Para a mesma simulação foi feito um teste rodando o PSO e obtendo-se os valores corrigidos no ciclo 6 e ainda para este aplicou-se as transformações obtidas no ciclo 2, gerando desta forma as imagens das plumas: estimada (visualizada pelo operador), medida (Real), corrigida (transf. Ciclo 6) e corrigida (transf. Ciclo 2), conforme apresentado respectivamente nas figuras Figura 34, Figura 35, Figura 36 e Figura 37.

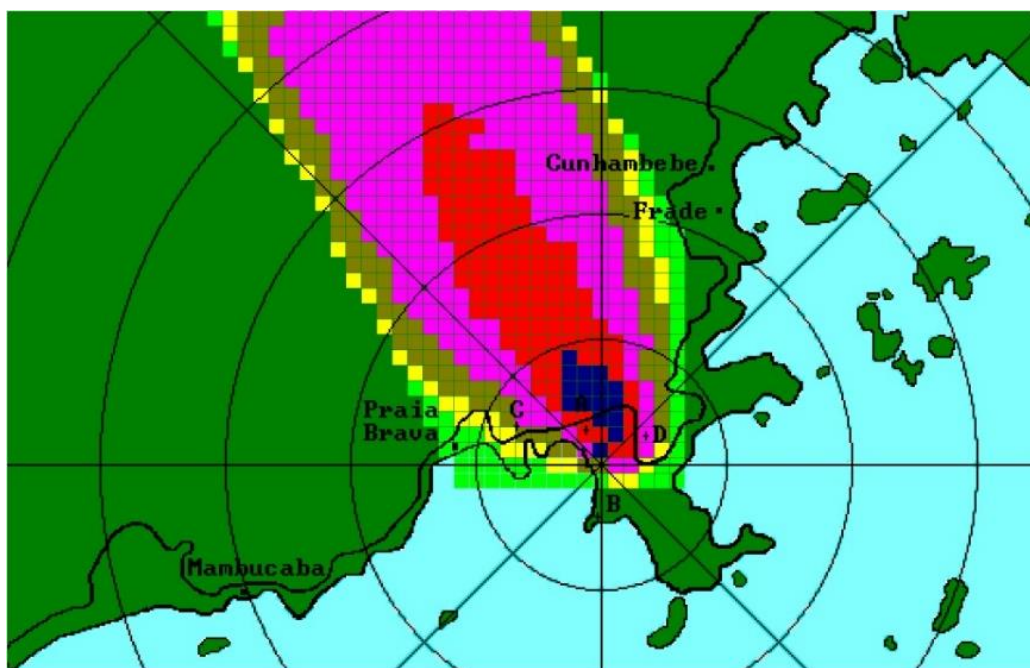


Figura 34 - Pluma estimada ciclo 6 1h e 15 minutos após o acidente (visualizada pelo operador)

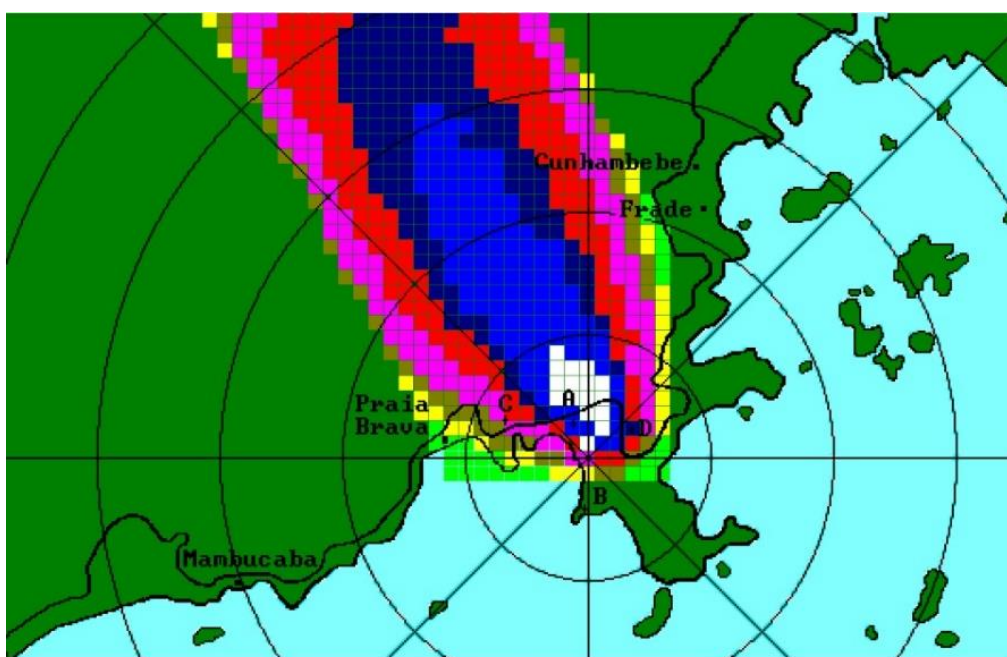


Figura 35 - Pluma real ciclo 6 1h e 15 minutos após o acidente

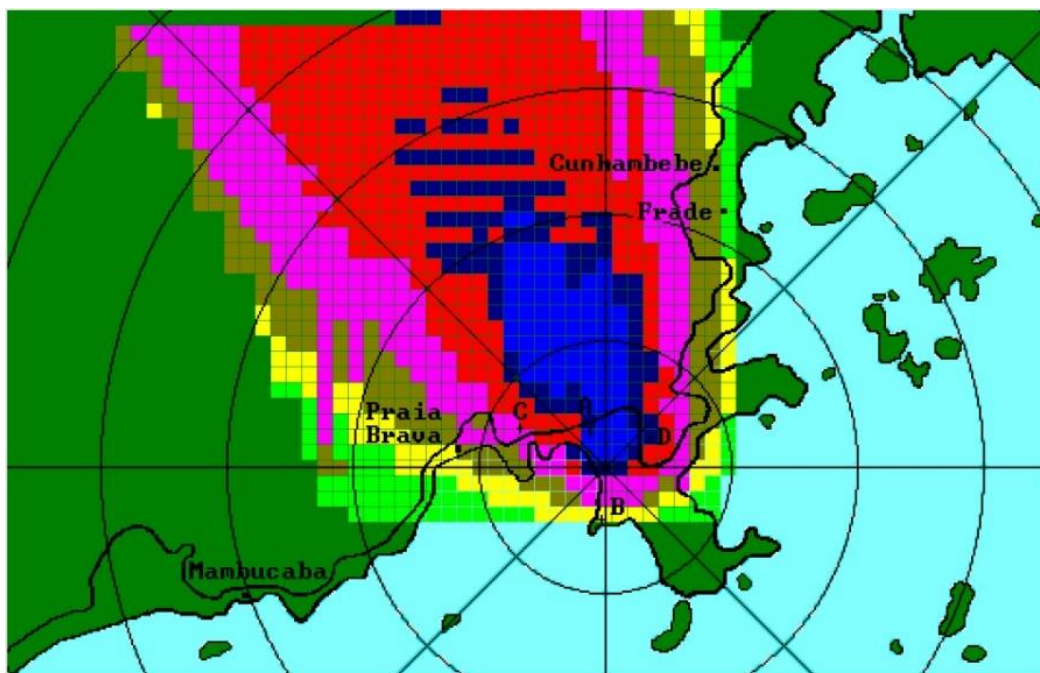


Figura 36 - Pluma corrigida no ciclo 6 1h e 15 minutos após o acidente (com transformadas do ciclo 6)

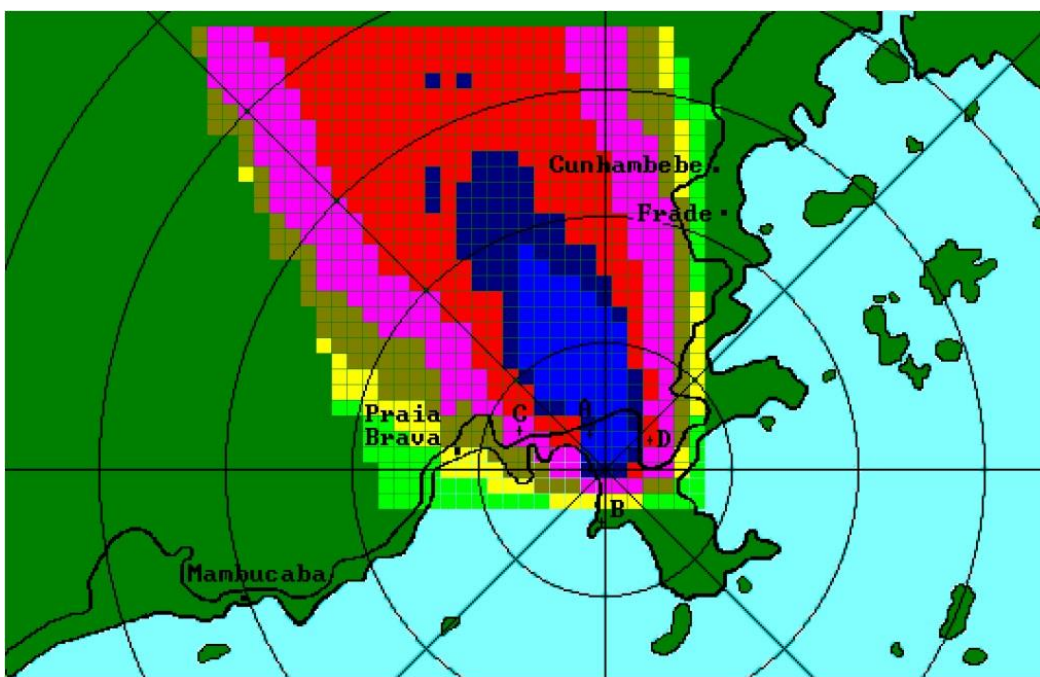


Figura 37 - Pluma corrigida no ciclo 6 1h e 15 minutos após o acidente (com transformadas do ciclo 2)

O gráfico da Figura 38, destaca a similaridade entre a correção pelo PSO dos valores corrigidos no ciclo 6 com as transformações geométricas obtidas neste, bem como os valores corrigidos no ciclo 6 utilizando as transformações geométricas obtidas no ciclo 2.

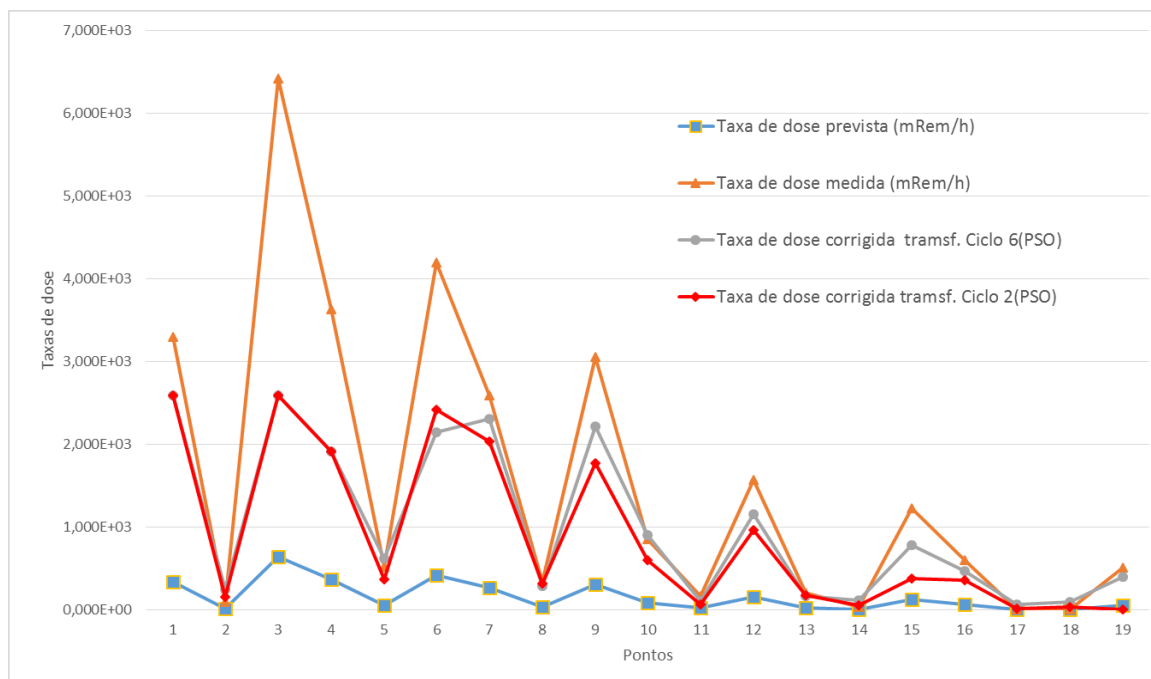


Figura 38 - Grafico ciclo 6

A Tabela 11 destaca as diferenças entre as médias dos erros para a correção das plumas nos dois momentos, bem como os demais erros apresentados nos outros testes.

Tabela 11 – Valores aplicados ao o ciclo 6

Ponto #	Posição na matriz (x,y)		Taxa de dose prevista (mRem/h)	Taxa de dose medida (mRem/h)	Taxa de dose corrigida transf. Ciclo 6(PSO)	Taxa de dose corrigida transf. Ciclo 2(PSO)	Erro Medido- Previsto	Erro Medido- Corrigido -T6	Erro Medido- Corrigido - T2
1	39	16	3,294E+02	3,294E+03	2,584E+03	2,584E+03	8,787E+06	5,037E+05	5,037E+05
2	36	16	9,346E+00	9,346E+01	2,403E+02	1,512E+02	7,075E+03	2,155E+04	3,337E+03
3	38	18	6,418E+02	6,418E+03	2,585E+03	2,585E+03	3,336E+07	1,469E+07	1,469E+07
4	40	20	3,624E+02	3,624E+03	1,906E+03	1,906E+03	1,064E+07	2,951E+06	2,951E+06
5	34	19	5,176E+01	5,176E+02	6,220E+02	3,611E+02	2,170E+05	1,089E+04	2,450E+04
6	36	21	4,195E+02	4,195E+03	2,147E+03	2,411E+03	1,426E+07	4,196E+06	3,183E+06
7	38	23	2,590E+02	2,590E+03	2,304E+03	2,035E+03	5,432E+06	8,162E+04	3,081E+05
8	32	21	3,312E+01	3,312E+02	2,874E+02	3,095E+02	8,884E+04	1,918E+03	4,700E+02
9	35	24	3,050E+02	3,050E+03	2,216E+03	1,770E+03	7,534E+06	6,945E+05	1,638E+06
10	38	27	8,486E+01	8,486E+02	9,047E+02	5,987E+02	5,833E+05	3,146E+03	6,242E+04
11	28	23	1,633E+01	1,633E+02	1,047E+02	5,773E+01	2,159E+04	3,434E+03	1,114E+04
12	33	28	1,568E+02	1,568E+03	1,152E+03	9,558E+02	1,991E+06	1,731E+05	3,747E+05
13	38	33	2,021E+01	2,021E+02	1,585E+02	1,730E+02	3,307E+04	1,895E+03	8,458E+02
14	23	28	3,031E+00	3,031E+01	1,109E+02	4,898E+01	7,440E+02	6,497E+03	3,488E+02
15	29	34	1,223E+02	1,223E+03	7,819E+02	3,708E+02	1,211E+06	1,945E+05	7,261E+05
16	35	34	5,948E+01	5,948E+02	4,660E+02	3,578E+02	2,865E+05	1,657E+04	5,617E+04
17	17	34	0,000E+00	0,000E+00	6,281E+01	1,333E+01	0,000E+00	3,945E+03	1,777E+02
18	39	40	0,000E+00	0,000E+00	8,936E+01	3,269E+01	0,000E+00	7,985E+03	1,068E+03
19	30	43	5,087E+01	5,087E+02	3,938E+02	0,000E+00	2,096E+05	1,319E+04	2,588E+05
Média							4,456E+06	1,241E+06	1,305E+06
Diferença entre aplicação das transformações do ciclo 2 para ciclos futuros com a transformação no próprio ciclo								-6,413E+04	

CAPITULO 5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho, foi proposta uma abordagem inovadora para melhorar a estimativa de dose devido ao material radioativo liberado em acidentes na centrais nucleares . Diferentemente de outros autores (Athey et al., 2013, Chow et al., 2008, Zheng e Chen, 2010 e Delle Monache et al, 2008), o método não tem como objetivo corrigir ou fazer novas estimativas para o termo fonte. Trata-se de uma abordagem mais simples e eficaz centrada no apoio à tomada de decisões. A ideia principal é fazer a correção diretamente no mapa de distribuição de doses (usando a saída do ADS), que é a base para a tomada de decisão em situações severas. Fazendo isso, é possível perpassar muitas incertezas possíveis, não só devido à estimativa do termo fonte, mas também devido a qualquer processo ou modelo físico representado no ADS.

As correções aplicadas aos mapas de distribuição dose estimados são transformações geométricas e atenuação ou amplificação dos valores de dose. Utilizando um algoritmo de otimização de enxames de partículas (PSO) foi possível encontrar um conjunto de transformações ótimas que, aplicado ao mapa originalmente estimado é capaz de torná-lo mais ajustado ao cenário real (caracterizado por um conjunto de medições de campo). Como resultado, um mapa de distribuição de dose muito mais próximo da realidade pode ser obtido, como pode ser visto na Figura 18.

Aplicando as mesmas transformações encontradas anteriormente (15 minutos após o início do acidente) para uma futura simulação (de tempo 45 minutos após o início do acidente), os resultados foram surpreendentemente bons como os anteriores (ver Figura 20c), indicando que a matriz de correção pode ser eficaz por um certo período após ter sido calculada. Aqui, com 30 minutos de diferença, os resultados ainda permanecem qualitativa e quantitativamente muito bons.

Quando as transformações ótimas foram aplicadas à um mapa de doses de 1 hora adiante, os resultados já não foram bons. Neste caso, as doses foram subestimadas. Este fato pode ser resolvido com o aumento da frequência do processo de otimização, que, se precisar, pode inclusive chegar a 15 minutos (que é o passo de tempo utilizado no SCA).

Entretanto, o alcance das projeções futuras, bem como a escolha da quantidade de pontos e das posições de medição de campo serão investigados e discutidos em trabalhos futuros.

A abordagem proposta aqui demonstrou ser eficaz para corrigir o mapa de distribuição espacial de dose estimada pelo ADS, a fim de torná-lo mais preciso, refletindo melhor o cenário real e dando um apoio efetivo à tomada de decisões.

Dentre os futuros trabalhos decorrentes desta tese pode-se citar:

- i) A investigação de método para a escolha dos pontos para medidas de campo;
- ii) Aplicação do método a outros estudos de caso visando identificar a necessidade ou não da inclusão de outros tipos de transformações;
- iii) Considerar medidas em diferentes instantes de tempo (considerar a dinâmica de evolução da pluma) no processo de otimização;
- iv) Embora o tempo de execução do PSO tenha sido aceitável (<15 minutos), para um mapa mais refinado este tempo poderia aumentar. Assim, o uso de computação paralela poderia ser atraente.

Referências

AGRAWAL, P. Tool And Algorithms for Rapid Source Term Prediction (RASTEP) Based on Bayesian Belief Networks. **Uppsala University**, 2015.

ATHEY, G. F.; BRANDON, L. K.; RAMSDELL, J. J.V. NRC. **RASCAL 4.3 WORKBOOK**, 2013.

AZEVEDO, E.; CONCI, A. **Computação Gráfica. Teoria e Prática**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2003.

CHINO, M. et al. Preliminary Estimation of Release Amounts of ¹³¹I and ¹³⁷Cs Accidentally Discharged from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant into the Atmosphere. **Journal of Nuclear Science and Technology**, p. 1129-1134, 2011.

CHOW, F. K.; KOSOVIC, B.; CHAN, S. Source Inversion for Contaminant Plume Dispersion in Urban Environments Using Building-Resolving Simulations. **American Meteorological Society**, p. 47, 1553–1572, 2008.

COPPE/UFRJ - NUCLEAR, LABORATÓRIO DE ANÁLISE E SEGURANÇA. **SCA-MOD - Sistema de Controle Ambiental - Modelagem**. Rio de Janeiro: [s.n.], v. 3, 1987.

DEDDA, F. D. Definition of a dynamic source term module within RASTEP Linking with a fast running deterministic code. **CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY**, 2013.

DELLE MONACHE, L. L. J. K. et al. Bayesian Inference and Markov Chain Monte Carlo Sampling to Reconstruct a Contaminant Source on a Continental Scale. **J. Appl. Meteor. Climatol.**, **47**, 2008. 2600–2613.

FAUSKE, A. Fauske & Associates. **Fauske & Associates**, 5 nov. 2014.
Disponível em: <<http://blog.fauske.com/blog/bid/399542/MARS-A-Powerful-Severe-Accident-Modeling-Tool-for-27-Years>>.

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A. **Especificação Funcional do Sistema de Controle Ambiental (SCA)**. Rio de Janeiro: [s.n.], 1987.

IRSN. Accident de Tchernobyl : déplacement du nuage radioactif. **http:**
[//www.irsn.fr](http://www.irsn.fr), 2005. Disponível em:
<http://www.irsn.fr/FR/popup/Pages/tchernobyl_video_nuage.aspx>.

KAEWKAMNERDPONG B., B. P. J. "perceptive particle swarm optimization", adaptive and natural computing algorithms: proceedings of the international conference in coimbra. **Proceedings of the International Conference in Coimbra**, p. 259-263, 2005.

KENNEDY, J.; EBERHART, R. C. Particle Swarm Optimization. **Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, Vol. 4**, 1995. 1942-1948.

KNOCHENHAUER, M.; SWALING, V. H.; ALFHEIM, P. Using Bayesian Belief Network (BBN) Modelling for Rapid Source Term Prediction – RASTEP Phase 1. **International Nuclear Information System**, 3 set. 2012.

LAURITZEN, B.; DREWS, M. EXTENDED KALMAN FILTER ANALYSIS OF SHORT-RANGE ATMOSPHERIC. **www.researchgate.net**. Disponível em:
<<https://www.researchgate.net/publication/237834974>>.

MCKENNA, T. J.; GIITTER, J. G. Source Term Estimation During Incident Response to Severe Nuclear Power Plant Accidents. **NUREG-1228**, 1988.

NENP-WEBMASTER, I. -. Nuclear Power Engineering. **IAEA - International Atomic Energy Agency**, 4 fev. 2016. Disponivel em: <<https://www.iaea.org/NuclearPower/landC/>>.

RODRIGUEZ, L. M. et al. COUPLING A GENETIC ALGORITHM WITH AN ATMOSPHERIC TRANSPORT AND DISPERSION MODEL. **The Pennsylvania State University Department of Meteorology**.

RODRIGUEZ, L. M.; HAUPTA, S. E.; YOUNGB, G. S. Impact of sensor characteristics on source characterization for dispersion modeling. **Elsevier - Measurement Volume 44, Issue 5**, 2 fev. 2011. 802–814.

TERADA, H. et al. Atmospheric discharge and dispersion of radionuclides during the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. Part II: verification of the source term and analysis of regional-scale atmospheric dispersion. **Journal of Environmental Radioactivity**, 19 maio 2012. 141–154.

WAINTRAUB, M. ALGORITMOS PARALELOS DE OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS. **UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia**, p. 7-14, 2009.

YEE, E. Inverse Dispersion for an Unknown Number of Sources: Model Selection and Uncertainty Analysis. **International Scholarly Research Network**, p. 20, 10 jul. 2012.

ZHENG, X.; CHEN, Z. Back-calculation of the strength and location of hazardous materials releases using the pattern search method. **Journal of Hazardous Materials** **183**, Issues **1–3**, 2010. 474–481.

ZHENG, X.; CHEN, Z. Inverse calculation approaches for source determination in hazardous chemical releases. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, 6 jan. 2011. 293–301.